



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Reaktorentwicklung

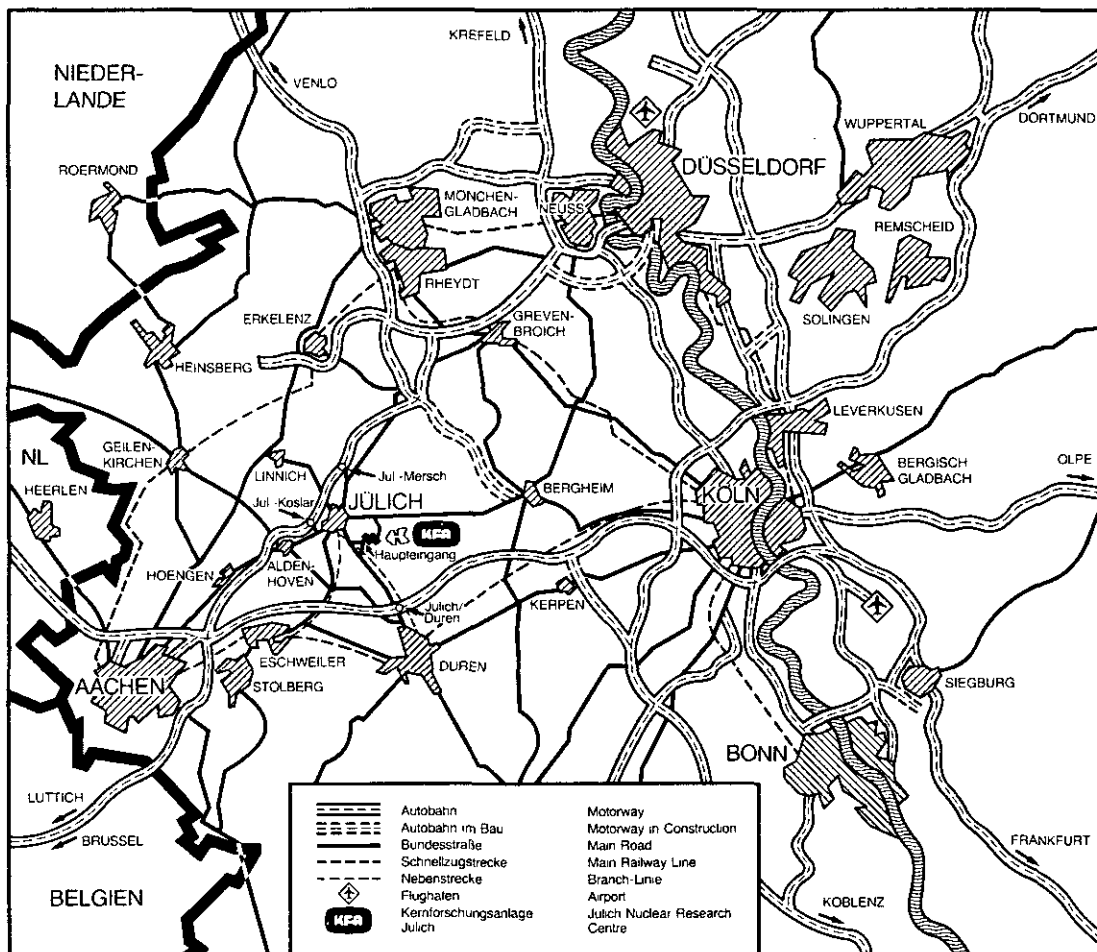
**KVR Kugelhaufen-Versuchs-Reaktor
in Peu-à-Peu Beschickung**

**Auslegung, Betriebs- und Sicherheitsverhalten
mittels Computersimulation**

von

Lutz Kranz

Jül-Spez-434
März 1988
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 434
 Institut für Reaktorentwicklung Jül-Spez-434

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

KVR Kugelhaufen-Versuchs-Reaktor in Peu-à-Peu Beschickung

**Auslegung, Betriebs- und Sicherheitsverhalten
mittels Computersimulation**

von

Lutz Kranz

Pebble Bed Test Reactor in Peu-à-Peu Load

Design, Operation and Safety Behaviour
by means of Computer Simulation

by

Lutz Kranz

ABSTRACT

The presented work deals with a new type of load model for high temperature reactors with spherical fuels: the Peu-à-Peu load system.

Using this load system the reactor core is only filled partially in the beginning of the power operation. But it has to be a critical base core. With proceeding burn-off the reactor is filled up with further fuel elements the way that it stays always just critically. When the reactor is filled up completely with fuel elements, the reactor operation has to be interrupted and the reactor has to be discharged. Afterwards a new cycle can start like the one just described.

A reference reactor with 100 MW thermal power is investigated in this work in detail and should make clear the way of function of the load system and the base idea of "simplicity and safety".

The improvement proposal to use again a part of the fuel elements of a cycle for the next cycle minimizes the higher specific uranium need of a Peu-à-Peu reactor decisively.

KVR Kugelhaufen-Versuchs-Reaktor
in Peu-à-Peu Beschickung

Auslegung, Betriebs- und Sicherheitsverhalten
mittels Computersimulation

von

Lutz Kranz*

KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit einem neuartigen Beschickungsschema für Hochtemperaturreaktoren mit kugelförmigen Brennelementen: dem Peu-à-Peu Beschickungssystem.

Bei diesem Beschickungssystem wird das Reaktorcore zu Beginn des Leistungsbetriebes nur teilgefüllt. Es muß aber schon ein kritisches Grundcore sein. Mit fortschreitendem Abbrand wird der Reaktor mit weiteren Brennelementen so aufgefüllt, daß er immer gerade kritisch bleibt. Wenn der Reaktor vollständig mit Brennelementen gefüllt ist, muß der Reaktorbetrieb unterbrochen und der Reaktor entleert werden. Danach kann ein neuer, wie der gerade beschriebene Zyklus beginnen.

Ein Referenzreaktor mit 100 MW thermischer Leistung wird in dieser Arbeit eingehend untersucht und soll die Funktionsweise des Beschickungssystems und die Grundidee "Einfachheit und Sicherheit" verdeutlichen.

Der Verbesserungsvorschlag, einen Teil der Brennelemente eines Zyklusses im nächsten Zyklus wiederzuverwenden, verringert den höheren spezifischen Uranbedarf eines Peu-à-Peu Reaktors entscheidend.

Vorwort

Diese Arbeit entstand als Diplomarbeit für das Studium des Maschinenbaus, Vertieferrichtung Reaktortechnik, an der RWTH Aachen. Sie wurde am Institut für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH erstellt.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. R. Schulten danke ich für die Themenstellung und für sein Interesse am Verlauf der Arbeit.

Herrn PD. Dr. rer. nat. E. Teuchert gilt mein Dank für die umsichtige Betreuung und Beratung vor allen bei den theoretischen Problemstellungen.

Herrn K. A. Haas danke für die Einarbeitung in das "V.S.O.P. Rechenprogramm" und für die Beantwortung der vielen Fragen.

Meinen Eltern gilt der besondere Dank für die Unterstützung durch das ganze Studium und auch für die kritische Durchsicht der vorliegenden Arbeit, die hoffentlich einer besseren Verständlichkeit diene.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Institutes für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH für die zahlreichen Diskussionen, die einem jungen Studenten eine große Hilfe waren.

Aachen, im März 1988

Lutz Kranz

Inhaltsverzeichnis

1.0	Einleitung	1
2.0	Das Peu-à-Peu Referenzkonzept eines Kugelhaufenreaktors	3
2.1	Grundüberlegungen für diesen Reaktor	3
2.2	Ausführung des Reaktors	10
2.2.1	Außerhalb des Cores	11
2.2.2	Das Brennelement	12
2.2.3	Das Core	15
2.3	Betriebsverhalten des Reaktors	20
2.3.1	Auffüllen des Cores mit Brennelementen	20
2.3.1.1	Position der Regelstäbe	20
2.3.1.2	Thermixrechnung	21
2.3.2	Leistungs- und Temperaturverteilung	22
2.3.3	Die Abbrandverteilung	25
2.4	Störfallverhalten des Reaktors	27
2.4.1	Die maximale Störfalltemperatur	29
2.4.2	Räumliche Darstellung der Temperaturverteilung	30
2.4.2.1	3D Bilder von den krit. Störfallzeitpunkten	31
2.4.2.2	3D Bilder eines zeitlichen Störfallverlaufes	33
3.0	Vergleich der Beschickungssysteme OTTO und Peu-à-Peu	37
3.1	Der OTTO-Reaktor	37
3.1.1	Vom Anfangscore zum Gleichgewichtscore	38
3.1.2	Die charakteristischen Daten des OTTO-Reaktors	38
3.1.3	Das Störfallverhalten des OTTO-Reaktors	40
3.2	Unterschiede der Reaktoren und die sich daraus ergebenden Vor- und Nachteile	41
3.2.1	Höherer Brennstoffbedarf des Peu-à-Peu Reaktors	43
3.2.2	Welche Leistungssteigerungen sind bei den Reaktoren noch möglich?	45
3.2.2.1	Mögliche Leistungserhöhungen ohne Veränderungen an den Reaktoren	45
3.2.2.2	Größere Reaktoren mit Beschickungssystemen OTTO oder Peu-à-Peu	46
4.0	Verbesserungen am Peu-à-Peu Konzept	47
4.1	Sinnvolle Zielsetzungen der Verbesserungen	47
4.2	Verbesserung der Uranausnutzung	49
4.2.1	Neues Grundcore mit wiederverwendeten Brennelementen	49
4.2.2	Höhere Anreicherung der zugeladenen Brennelemente	55
5.0	Einsatzmöglichkeiten des Peu-à-Peu Konzeptes	57
6.0	Literaturverzeichnis	59

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1.	Leistungsverteilung eines Peu-à-Peu Reaktors zu drei verschiedenen Zykluszeitpunkten.	4
Abb. 2.	Leistungsverteilung eines OTTO-Reaktors bei Vollast	5
Abb. 3.	Aufbau des Peu-à-Peu Reaktors	10
Abb. 4.	HTR-Brennelement einschließlich Coated Partikel	13
Abb. 5.	Temperaturabhängigkeit der CS 137 Freisetzung	14
Abb. 6.	Temperatur- und Leistungsverläufe der verschiedenen Grundcoretypen .	19
Abb. 7.	Gegenüberstellung unterschiedlich häufig wiederholter Temperaturrechnungen	22
Abb. 8.	Leistungs- und Temperturverteilung zu 3 Füllungsständen	24
Abb. 9.	Abbrandverteilung des Peu-à-Peu Reaktors	26
Abb. 10.	Zeitlicher Verlauf der Störfalltemperatur zu 3 Füllungsgraden	28
Abb. 11.	Störfalltemperaturen beim störfallmäßig krit. Füllungsgrad	29
Abb. 12.	Ausschnittsvergrößerung der letzten Abb.	30
Abb. 13.	2 Dimensionale Störfalltemperaturverteilung des Grundcores	31
Abb. 14.	2 Dimensionale Störfalltemperaturverteilung des Halbcores	32
Abb. 15.	2 Dimensionale Störfalltemperaturverteilung des Vollcores	32
Abb. 16.	Temperaturverteilung im Grundcore zum Beginn des Störfalles	33
Abb. 17.	Temperaturverteilung im Grundcore nach 18.5 h (Maximum)	34
Abb. 18.	Temperaturverteilung im Grundcore nach 42 h	34
Abb. 19.	Temperaturverteilung im Grundcore nach 94 h	35
Abb. 20.	Leistung-, Temperatur- und Abbrandverteilung des OTTO-Reaktors	40
Abb. 21.	Verlauf der max. Störfalltemperatur des OTTO-Reaktors	41
Abb. 22.	Vergleich Abbrandverteilung 4-Schichten-Sparcore und Referenzreaktor .	53
Abb. 23.	Vergleich Abbrandverteilung 6-Schichten-Sparcore (13 %) und Referenzreaktor	54
Abb. 24.	Vergleich Abbrandverteilung 6-Schichten-Sparcore (14 %) und Referenzreaktor	54

1.0 Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1. Daten des Peu-à-Peu Basisreaktors	11
Tab. 2. Verschiedene Grundcorevarianten.	17
Tab. 3. Daten des OTTO-Basisreaktors	39
Tab. 4. Vergleichsdaten der verschiedenen Reaktoren.	43
Tab. 5. Verschiedene Grundcorevarianten mit wiederverwendeten Brennelementen. .	50
Tab. 6. Zykluszeit, Uranbedarf und Abbrand beim Einsatz von Spargrundcores ...	52
Tab. 7. Verschiedene Anreicherung der aufgeladenen Brennelemente	56

1.0 Einleitung

Die Idee eines Peu-à-Peu Beschickungssystems, bei dem nicht direkt das ganze Reaktorcore mit Brennstoff gefüllt wird, sondern bei dem anfänglich nur ein Grundcore aufgebaut wird, das dann während des Leistungsbetriebes des Reaktors, peu à peu, aufgefüllt wird, ist eine Variante der Anwendung des Hochtemperatur-Reaktorkonzeptes. Die in der Bundesrepublik Deutschland realisierten Kugelhaufenreaktoren, der AVR-Versuchsreaktor in Jülich und der THTR-Leistungsreaktor in Hamm-Uentrop arbeiten nach dem sogenannten MEDUL (MEhrfachDURchLauf) Beschickungssystem. Die kugelförmigen Brennelemente durchlaufen den Reaktor so schnell, daß sie bei einem Durchlauf nur einen Teilabbrand erreichen, während sie in der Größenordnung 10 Durchläufe absolvieren müssen, um der Auslegung entsprechend abzubrennen. Als ein mechanisch aufwendiges Bauteil bei diesen Reaktoren hat sich der Kugelabzug und hier vor allem die Vorrichtung, die auf Grund des schon erreichten Abbrandes und der Unversehrtheit des jeweiligen Brennelementes entscheidet, ob das Brennelement wieder in den Reaktor oder in die Entsorgung gegeben wird, erwiesen.

Dies war mit ein Grund, das Reaktorbeschickungskonzept so abzuändern, daß die Brennelemente nur noch einmal, aber so langsam durch den Reaktor laufen sollen, daß sie vollständig abbrennen und dann ohne weitere Verzweigungsmöglichkeiten in die Entsorgung gelangen können. Dieses Beschickungsverfahren trägt den Namen OTTO (Once Through, Then Out). Die Fortführung dieses Gedankens der Vereinfachung führte dann zum Peu-à-Peu Beschickungskonzept /TE 87/. Bei diesem kann auf das gesamte Kugelabzugssystem verzichtet werden. Die bauliche Ausführung eines nach diesem System arbeitenden Kugelhaufenreaktors würde sich weiter vereinfachen und verbilligen.

Die Erstellung eines Peu-à-Peu Reaktorentwurfes und die Untersuchung seines nuklearen Betriebsverhaltens und auch seines Störfallverhaltens sind Inhalt der vorliegenden Arbeit. Zu der Durchführung dieser Untersuchungen wird der Reaktor in seiner baulichen, nuklearen und thermohydraulischen Struktur mit dem V.S.O.P Computer Code System /TE 80/ simuliert. Hier handelt es sich um ein Rechenprogramm, das im Institut für Reaktorentwicklung der KFA Jülich entwickelt wurde und besonders für die Simulation von Kugelhaufenreaktoren geeignet ist.

Das erste Ziel der Simulationsuntersuchungen ist die Erstellung eines Referenzkonzeptes eines Kugelhaufenreaktors mit Peu-à-Peu Beschickung. Dieses Referenzkonzept soll eine möglichst einfache Ausführung eines solchen Reaktors darstellen. Es soll ermöglichen, daß man leicht die Funktionsweise und die Besonderheiten dieses Reaktorkonzeptes erkennen kann. Darüberhinaus dient ein solches "Basismodell" auch als

Vergleichsmaßstab für weitere Entwicklungs- und Verbesserungsmöglichkeiten an dem Basisreaktor selbst, als auch für Vergleiche mit anderen Reaktorkonzepten.

Als erster Vergleich ist es sinnvoll, die beiden Beschickungskonzepte, OTTO und Peu-à-Peu, gegenüberzustellen. Daher wurde bei der Auslegung des Referenzreaktors darauf geachtet, daß er in der Leistung und in den Abmaßen einem OTTO-Referenzreaktor, der zur selben Zeit ausgelegt wurde, entspricht. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung dieser Beschickungssysteme werden im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit dargestellt.

Als nächster Schritt werden dann noch Verbesserungs- und Optimierungsideen untersucht und nach ihrer Wirksamkeit bewertet. Mit Hilfe dieser Untersuchungen wird dann aufbauend auf das Referenzkonzept ein zweiter Realisierungsvorschlag erarbeitet, der aufzeigen soll, welche Möglichkeiten mit diesem Reaktorkonzept noch realisiert werden können.

Der vorsichtige Versuch eines Vergleiches der bewährten Leichtwasserreaktoren mit dem sich noch in den ersten Forschungsstadien befindlichen Peu-à-Peu Reaktor soll am Ende der Arbeit dem Leser die Vorteile wie auch die Nachteile des neuartigen Konzeptes verdeutlichen und ihm somit die Möglichkeiten und Einsatzchancen dieses Reaktorkonzeptes aufzeigen.

2.0 Das Peu-à-Peu Referenzkonzept eines Kugelhaufenreaktors

2.1 Grundüberlegungen für diesen Reaktor

Der hier konzipierte Reaktor soll die Möglichkeit bieten, die Funktionsweise des Beschickungssystems aufzuzeigen. Darüber hinaus soll sein Aufbau als Vergleichsmaßstab für alle weiteren Reaktoren mit diesem Beschickungssystem und auch als Vergleich mit andersartigen Reaktorkonzepten dienen.

Der Referenzreaktor hat daher folgende Grundvoraussetzungen zu erfüllen:

1. Peu-à-Peu Beschickung
2. Definitiv passive Sicherheit
3. Einfache Basisausführung

Im folgenden sollen nun die Auswirkungen dieser Grundvoraussetzungen auf die konstruktive Ausführung des Reaktor dargestellt werden:

1. Die Peu-à-Peu Beschickung

Im Hinblick auf die Einhaltung der Kritikalitätsbedingung $k_{eff} = 1$ ist der Peu-à-Peu Reaktor ein Mittelweg zwischen einem batchweise beschickten Reaktor und einem kontinuierlich beschickten Kugelhaufenreaktor. Der Leichtwasserreaktor wird zum Zyklusanfang einmal beladen. Die Überschußreaktivität, die er zwangsläufig hat, um bis zum Zyklusende kritisch zu sein, muß mit der Hilfe von abbrennbarem Gift, im Kühlmittel gelösten Absorbermaterial und Regelstabeinsatz gebunden werden. In einem Kugelhaufenreaktor mit kontinuierlichem Brennstoffdurchsatz ist dagegen im Reaktor nur soviel Überschußreaktivität vorhanden, wie zur Regelung des Betriebes notwendig ist. Beim Peu-à-Peu System dagegen wird ein kritisches Grundcore im Reaktor durch Teilfüllung mit Brennelementen aufgebaut und immer dann Brennstoff nachgeladen, wenn die Kettenreaktion wegen des zunehmenden Abbrandes zum Erliegen kommen würde. So wird durch den nicht vorhandenen Brennstoff im oberen Corebereich K_{eff} auf ungefähr 1 gehalten. Ein solcher Reaktor brauchte also weder ein Brennelementeabzugssystem, noch ein System, welches die Überschußreaktivität kompensiert. Als Nachteil erscheint auf den ersten Blick, daß über eine Zyklusdauer ständig eine andere Corebeladung und mit ihr eine unterschiedliche Leistungsverteilung vorliegt. Die Leistungsverteilung ändert sich mit dem Befüllen des Reaktors so, daß die Leistung, die zuerst vollständig vom Grundcore erbracht werden muß und im Grundcore

zu einer relativ konstanten Leistungsverteilung auf hohem Leistungsniveau führt, am Ende der Beladung zu einer sehr ungleichmäßigen Leistungsverteilung mit einem Leistungsmaximum in den oberen frisch aufgeladenen Corezonen führt.

Siehe dazu Abb. 1, die die Leistungsverteilung zu drei Zykluszeitpunkten eines älteren Peu-à-Peu Reaktorkonzeptes zeigt.

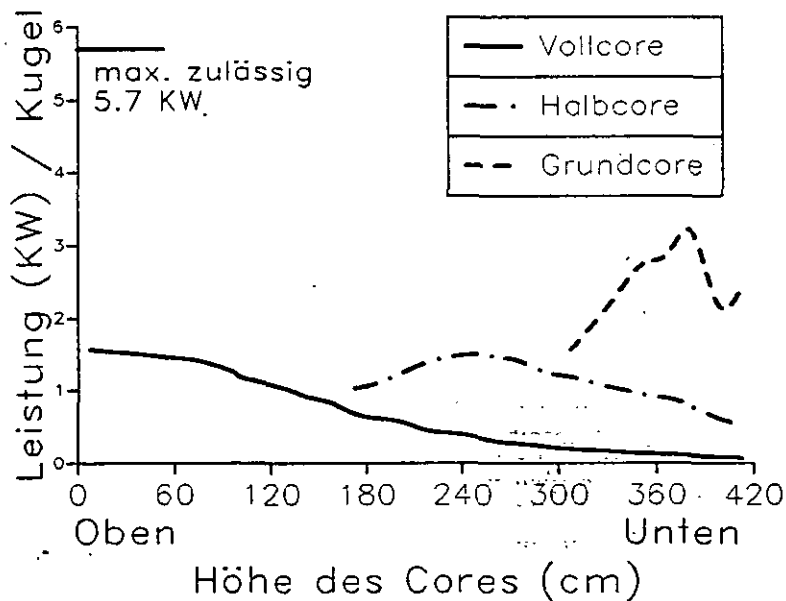


Abb. 1. Leistungsverteilung eines Peu-à-Peu Reaktors zu drei verschiedenen Zykluszeitpunkten.

Die Darstellung, wie sich die Leistungsverteilung ändert, macht deutlich, daß man auch einen Peu-à-Peu Reaktor auf eine konstante Gesamtleistung während der ganzen Zykluszeit auslegen kann, obwohl man einmal ernsthaft die Frage untersuchen sollte, ob nicht für einige Reaktortypen eine veränderliche Leistung ökonomischer wäre.

Es muß jetzt geklärt werden, ob diese unvermeidlich ungleichmäßige Leistungsverteilung nicht schon von vornherein ein großer Nachteil für einen peu à peu beschickten Reaktor ist.

Die Leistungsverteilung eines solchen Reaktors stellt keinen so großen Unterschied zu der in Kugelhaufenreaktoren mit OTTO-Beschickung dar, da auch diese eine sehr ungleichmäßige axiale Leistungsverteilung haben. Diese Leistungsverteilung wird dort durch folgende Umstände bedingt:

Als Kühlmittel wird das Edelgas Helium verwendet. Es durchströmt den Reaktor von oben nach unten. Hieraus folgt: Die Kühlmittelaufheizspanne beträgt zirka 400 °C über die Reaktorcorehöhe, wobei sich der höchste Brennstoffabbbrand auch noch im unteren Corebereich, dem heißesten Bereich des Reaktors, befindet. Da nun Temperaturerhöhung und auch hoher Abbbrand die Leistungserzeugung der Brennelemente mindern, stellt sich eine Leistungsverteilung mit deutlichem Maximum im oberen Corebereich ein. Die Abb. 2 zeigt dazu die Leistungsverteilung eines OTTO-Reaktors.

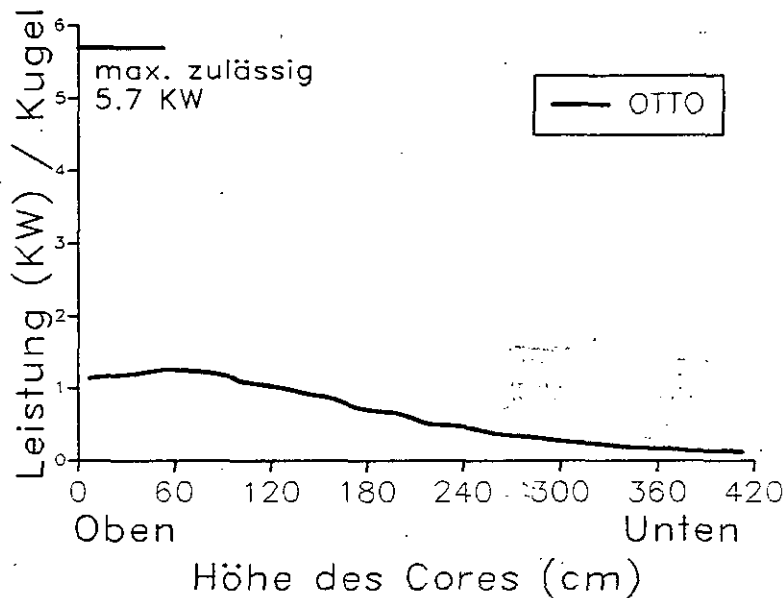


Abb. 2. Leistungsverteilung eines OTTO-Reaktors bei Vollast

Bei Kugelhaufenreaktoren wird die Leistung pro Kugel nicht bis an die physikalischen Grenzbelastungen der Kugel angenähert, da eine gewisse Schwankung der Leistungsdichte bei gasgekühlten Reaktoren unvermeidlich ist, und auch die Beherrschung von Nachwärmestörfällen durch passive Wärmeabfuhr mittels Wärmeleitung und -strahlung eine nicht zu hohe Leistungsdichte, von der dann auch die Nachwärmeleistung abhängig ist, erfordert. Der aus den gerade genannten Gründen vorhandene Abstand der spez. Leistung von den Grenzwerten ermöglicht es, ein Reaktorkonzept wie das Peu-à-Peu Konzept zu realisieren, obwohl bei diesem ein Grundcore mit deutlich höherer Leistungsdichte notwendig ist. Es muß aber zusätzlich noch geprüft werden, ob die passive Störfallsicherheit auch für das Grundcore besteht.

Bei der Auslegung des Grundcores muß darauf geachtet werden, daß dieses schon allein die geforderte Leistung erreichen kann. Dabei wird versucht, das Grundcore so klein wie möglich zu realisieren, um eine möglichst lange Standzeit des Reaktors zu erreichen. Es können dann nämlich mehr Schichten aufgeladen werden, und dies verlängert die Zykluszeit.

Zusätzlich zu diesen Bedingungen muß das Grundcore noch folgenden drei Bedingungen genügen:

Es muß erstens kritisch sein, zweitens darf die max. zulässige Kugelleistung von 5.7 KW pro Kugel nicht überschritten werden, und drittens dürfen die Temperaturen im Brennstoff nicht den Grenzwert von 1250 °C überschreiten.

Die genannten Bedingungen für das Grundcore bewirken, daß es einige Variationen erfordert, ein sinnvolles Grundcore zu konzipieren. Die Optimierung erfolgt mit Hilfe folgender Parameter: Es ist sinnvoll, die Höhe des Grundcores und die Anreicherung der Brennelemente zu verändern. In den folgenden Kapiteln wird dieses Optimierungsproblem noch ausführlich vorgestellt, und es werden dann auch die Vielzahl der Lösungsmöglichkeiten deutlich.

Das Auffüllen des Cores erfolgt dann so, daß kontinuierlich so viele Brennelemente nachgeladen werden, wie es der Abbrand im Reaktor erfordert. Alternativ zu dieser kontinuierlichen Beschickung wäre auch eine schichtweise Befüllung (z. B. in wöchentlichen Abständen) möglich.

Das Simulationsprogramm dagegen muß den Brennstoff sogar in recht großen Chargen¹ zuladen, da es sonst nicht möglich wäre, die Simulationsrechnungen in vertretbarer Zeit durchzuführen. Die Qualität der Ergebnisse leidet nicht unter den großen Brennstoffzugaben.

Der Verzicht auf eine Brennelemententnahme während des Betriebes und damit auf den kontinuierlichen Betrieb des Reaktors bedingt als wichtigsten Vorteil eine bauliche Vereinfachung und somit auch eine Verringerung der Baukosten. Ein zusätzlicher Vorteil ist, daß nur zu den Brennelementenwechseln abgebrannter Brennstoff gehandelt werden muß. Diese Arbeiten können dann von speziellen Fachkräften verrichtet werden.

¹ Die im Simulationsprogramm durchgeführten Brennstoffzuladungen (jeweils eine 15 cm starke Brennstoffschicht) führen im Durchschnitt zu 4 % Reaktivitätserhöhung. Diese Brennelementzuladungen sind unrealistisch hoch, doch um die Auffüllschritte nicht zu groß werden zu lassen, werden so große Brennelementmengen zugegeben. Das in diskreten Schritten den kontinuierlichen Betrieb simulierende Programm kann mit solchen k_{eff} Werten arbeiten, da es zwischen zeitlich kleinen Abbrandschritten die Flußverteilung wiederholt berechnet und die Leistung konstant hält.

2. Definitiv passive Sicherheit

Zuerst sollte kurz geklärt werden, was der Autor unter dem Begriff "Definitiv passive Sicherheit" versteht. Der Begriff "Absolute Sicherheit" ist mit keiner technischen Entwicklung, die irgendein Gefahrenpotential beinhaltet, vereinbar, da es immer zumindest eine theoretische Möglichkeit gibt, daß sich diese Gefährdung realisiert.

"Passive Sicherheit" bedeutet, daß ein System aus sich heraus auf Abweichungen vom Normalzustand auf Grund von physikalischen Gesetzen positiv reagiert, ohne daß technische Regelsysteme, die mit irgendeiner Wahrscheinlichkeit ausfallen könnten, eingreifen müssen.

"Definitiv passive Sicherheit" soll nun beschreiben, daß alle denkbaren Zustände eines Systems, in die es unter Berücksichtigung aller möglichen Systemfehler und aller möglichen Bedienungsfehler kommen kann, durch passive physikalische Vorgänge so beherrscht werden, daß sie völlig ungefährlich für die Umwelt bleiben. Das Wort "Definitiv passive Sicherheit" ist somit eine Einschränkung des unrealistischen Begriffes "Absolute Sicherheit", es verlangt aber die Sicherheit, daß das System aus sich heraus in keine gefährlichen Zustände gelangen kann.

Um der oben beschriebenen Forderung gerecht zu werden, muß ein Reaktor folgende Eigenschaften aufweisen:

- Er muß auf eine Leistungserhöhung auch ohne jedes Eingreifen mit einer Reaktivitätsabnahme reagieren. Dies kann recht einfach mit Hilfe der physikalisch bedingten negativen Reaktivitätsrückkopplung bei Temperaturerhöhung für alle Betriebszustände sichergestellt werden.

Zusätzlich muß sichergestellt werden, daß nur Reaktivitätserhöhungen möglich sind, die nach dem gerade genannten Wirkungsmechanismus zu beherrschen sind: ganz gleich, wie diese Reaktivitätserhöhungen auch zustande kommen, ob durch fehlerhafte Bedienung oder durch Bauteilversagen. Dieser Nachweis kann noch nicht vollständig in dieser Arbeit geführt werden. Da z. B. ein zu schnelles Regelstabausfahren zu einer solchen Reaktivitätserhöhung führen könnte, muß für die Regelstäbe sichergestellt sein, daß aufgrund der baulichen Ausführung der Regelstäbe kein zu schnelles Ausfahren möglich sein kann. Auch ein Wassereinbruch, verursacht durch einen Schaden an einem Helium-Wasser Wärmetauscher, könnte zu einer Reaktivitätserhöhung führen. Diese beiden Beispiele zeigen, daß die Forderung, alle unzulässigen Reaktivitätserhöhungen auszuschließen, für alle noch folgenden Auslegungsschritte höchste Priorität haben muß. Bei dem Ausfall aller Wärmeabfuhrsysteme, sowohl mit als auch ohne Druckentlastung des Primärsystems, darf die Aufheizung des Systemes durch die Nachwärme zu keiner Temperatur führen, die eine Freisetzung von Spaltprodukten aus den Brennelementen gestatten würde. Dazu muß die Größe und das Wärmeleitungsverhalten des Reaktors

so gewählt werden, daß die Wärmeenergie allein durch Wärmestrahlung und Konvektion der oben genannten Bedingung entsprechend abgeführt werden kann. Die untere Grenztemperatur für das Versagen der Spaltstoffzurückhaltung der Coated Partikels liegt bei ca. 1600 °C.

3. Einfache Basisausführung

Die Referenzauslegung soll die einfachste Form dieses Reaktortyps darstellen, sie soll damit auch die Grundlage und der Vergleichsmaßstab für Weiterentwicklungen sein. Da ein peu à peu beschickter Reaktor keinen Kugelabzug im Coreboden benötigt, kann man deshalb als einfachste Form des Cores einen Zylinder wählen: ebener Coreboden, zylindrische Wände.

Die Form des Cores ist somit festgelegt; Interessant ist jetzt die Frage der Größe eines solchen Cores. Die Beantwortung dieser Frage gibt zusätzlich einen Einblick in die Überlegungen, welche Leistung und Standzeit mit einem solchen Reaktor zu realisieren sind.

Für den max. Durchmesser des Reaktors bestehen zwei Bedingungen, die eingehalten werden sollen:

Zum einen muß gewährleistet sein, daß die unter dem Punkt "Definitiv passive Sicherheit" besprochene passive Wärmeabfuhr im Störfall gegeben ist. Dazu muß die Kombination Durchmesser, Leistungsdichte und Auswahl der wärmeabführenden Materialien so gegeben sein, daß die Temperaturen im Zentrum nicht die max. zulässigen übersteigen. Für den Durchmesser gilt, je größer er ist, desto höher steigen auch die max. Temperaturen.

Zum zweiten soll dieser Reaktor mit Regelstäben auskommen, die sich nur im Reflektor bewegen. Es sollen wegen des Nichtvorliegens des Kugelumwälzens beim Peu-à-Peu Konzept keine Regelstäbe, die in die Kugelschüttung einfahren wie beim THTR 300, verwendet werden.

Aus diesen Gründen wird als max. Durchmesser 3 m gewählt. Dieser Durchmesser entspricht dem Durchmesser des INTERATOM MODUL Reaktors, der auch die beiden oben genannten Bedingungen erfüllt.

Die Auslegung innerhalb des Druckbehälters wird auch in Anlehnung an dieses Konzept gewählt.

Die Corehöhe bedingt bei diesem Reaktor, wieviel Brennelemente insgesamt zugeladen werden können und damit die Länge des Betriebszyklus, die Zeit also bis zur notwendigen völligen Entladung des Reaktors. Es muß aber auch berücksichtigt werden, daß sie nicht so gewählt wird, daß Verluste bei der Gebläsearbeit auftreten, die die Vorteile

bedingt durch die größere Corehöhe aufzehren. Auch dürfen die Brennelemente im unteren Corebereich keine zu hohen Abbrände erreichen. Es wird daher beim Anfangskonzept die beladbare Corehöhe zu 420 cm gewählt.

Im nächsten Kapitel kann man sich diese Größen sehr gut an der Abb. 3 auf Seite 10, die den Aufbau des Reaktors darstellt, verdeutlichen.

Der so konzipierte Reaktor müßte nach Erfahrungswerten eine Leistung von 100 MW thermisch erbringen können.

Die Simulation wird zeigen, ob alle diese Annahmen, die für diesen Reaktor getroffen wurden, auch sinnvoll sind.

2.2 Ausführung des Reaktors

Um zusammenfassend einen Überblick über den Basisreaktor zu geben, ist in der Abb. 3 der Aufbau des Reaktors schematisch dargestellt.

Die anschließende Tabelle 1 listet dann die Ausgangsdaten und die sich daraus ergebenden Daten des Peu-à-Peu Basisreaktors auf. Es wird damit natürlich ein Vorgriff auf die im folgenden noch näher erläuterten Untersuchungen und Ergebnisse vorgenommen, es ist aber sinnvoll, diese Daten hier komplett zusammenzufassen.

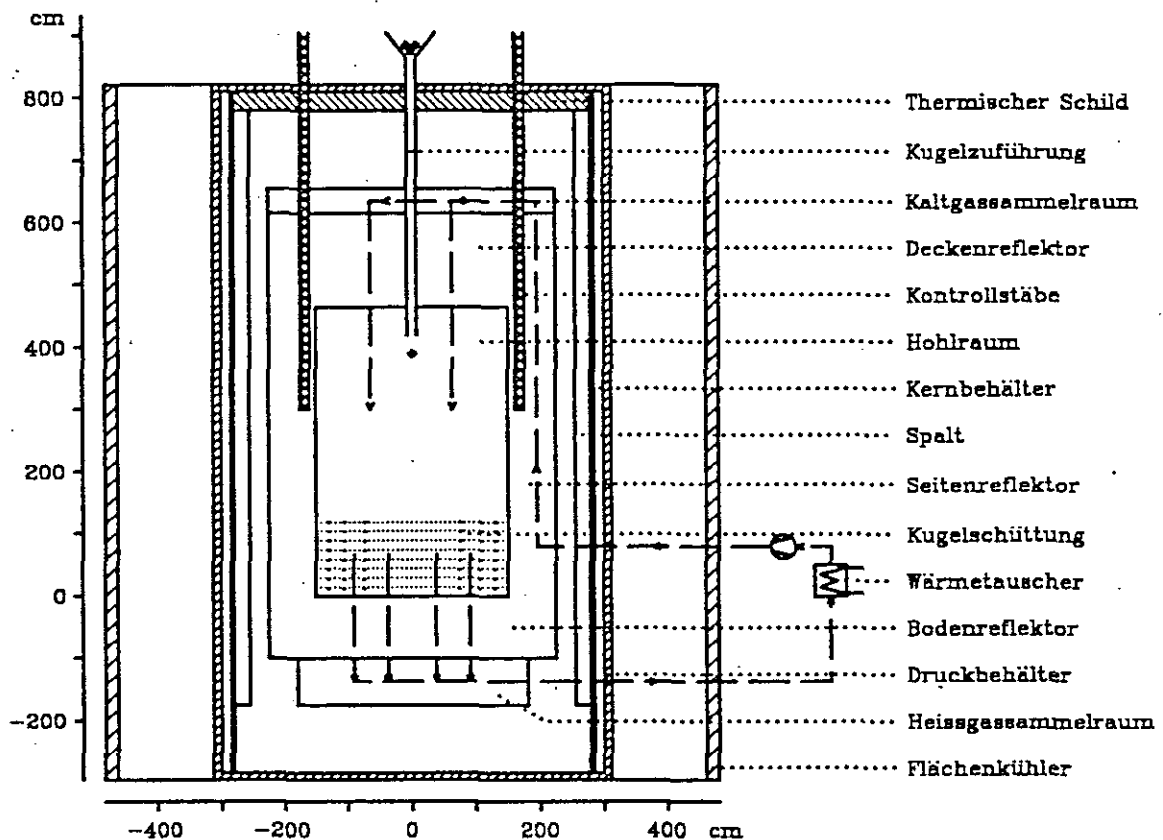


Abb. 3. Aufbau des Peu-à-Peu Reaktors

		Peu-à-Peu Start→Ende
Leistung therm.	MW	100
Höhe/Radius	cm	420/150
Brennstoff		UO ₂
Schwermetall	g/Kugel	7
Anreicherung	%	13(8*)
Eintritts./Austritts- Temperatur des Heliums	°C	250/750
Heliumdruck	bar	40
Mittlerer Abbrand	MWd/kg _{HM}	81
Dauer des Abbrandzyklus	Tage	913
Konversionsrate		0.36
Neutronen Leakage	%	31.6→17.0
Spaltstoff Inventar	kg/GW _{th}	372→598
U ₂₃₅ Beschickung/Entladung	kg/GWd _{th}	1.55/0.56
Pu _{fiss} Entladung	kg/GWd _{th}	0.092
U _{3O8} Bedarf	kg/GWd _{th}	385
max. Leistung pro Kugel	KW/Kugel	3.17→1.56
max. Brennstofftemperatur	°C	1147→819
Helium Druckverlust	bar	0.097→0.181
max. Druckentlastungs- störfalltemperatur	°C	1621→1492
* 30 cm Bodenschicht		

Tab. 1: Daten des Peu-à-Peu Basisreaktors

2.2.1 Außerhalb des Cores

Das Peu-à-Peu Beschickungssystem hat vor allem Auswirkungen auf die nuklearen Vorgänge im Reaktor. Es ist aber nicht möglich, allein das Reaktorkern zu simulieren, da die anderen Reaktorkomponenten auch die Neutronik beeinflussen. Die Reflektorbereiche um das Core herum beeinflussen die Vorgänge im Core direkt, weiter ist die Wärmeleitfähigkeit aller Komponenten mit entscheidend für die max. Störfalltemperatur.

Da bei Störfällen die entstehende Nachwärme allein durch passive Funktionsweise abgeführt werden soll (siehe Kapitel 1), ist es notwendig, das gesamte System so zu simulieren, daß eine realistische Situation der Wärmeleit- und Strahlungsvorgänge vorliegt. Wenn die Nachwärme nicht hinreichend abgeleitet werden kann, steigen im Störfall die Temperaturen über die kritischen Grenzen und eine Vermeidung einer Spaltstofffreisetzung ist nicht mehr gewährleistet.

Um nun den konstruktiven Aufwand in Grenzen zu halten, und um auch eine realistische und fehlerfreie Auswahl sicherzustellen, wurde der Reaktor so weit es möglich war, ähnlich dem des Interatom MODUL Reaktors /GHT 81/ aufgebaut.

Die Coredurchmesser beider Reaktoren sind genau gleich: Daraus folgt, daß sie auch im radialen Aufbau gleich erstellt werden können und sich nur in den vertikalen Maßen unterscheiden.

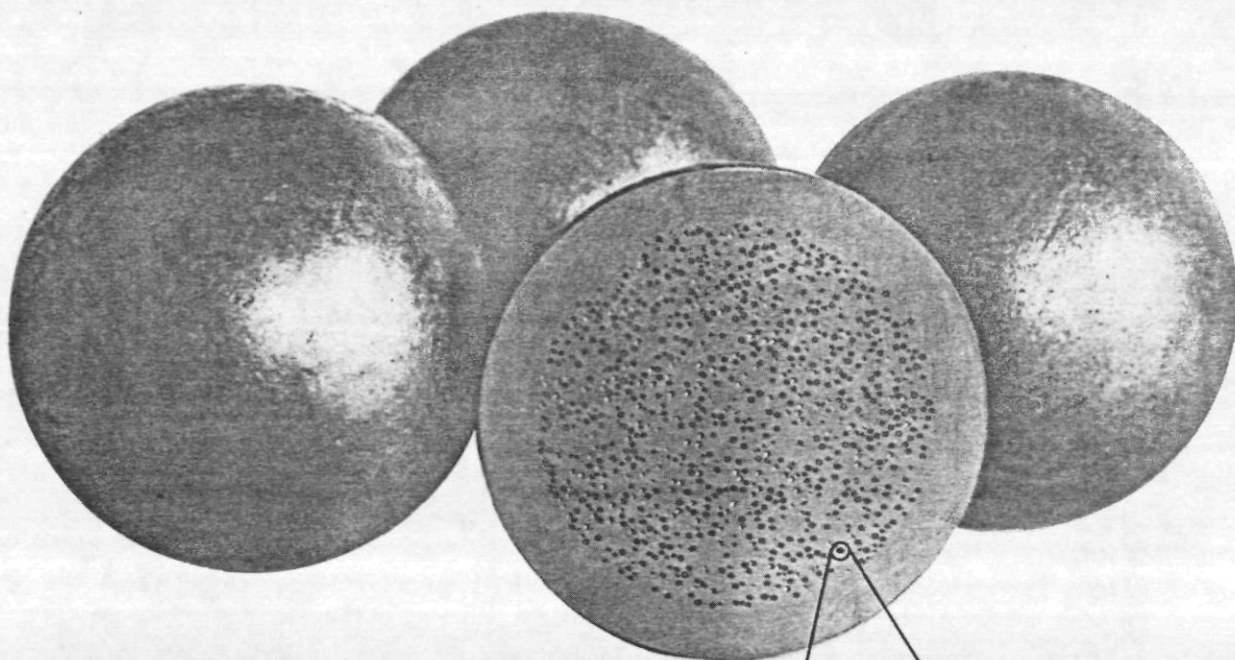
Damit ist für den Referenzreaktor sichergestellt, daß in erster Näherung keine unrealistischen Annahmen für die Coreumgebung getroffen worden sind. Zu einem späteren Zeitpunkt kann es einmal nützlich sein, diese Annahmen speziell für diesen Reaktor zu optimieren. In diesem Stadium garantiert diese Vorgehensweise aber ein hohes Maß an Bequemlichkeit bei der Auslegung.

2.2.2 Das Brennelement

Auch hier wird sinnvollerweise ein bewährtes, in allen Betriebssituationen getestetes Brennelement verwendet. Es handelt sich um ein Triso Brennelement mit 6 cm Durchmesser und einem Schwermetallgehalt von 7 gr/Kugel.

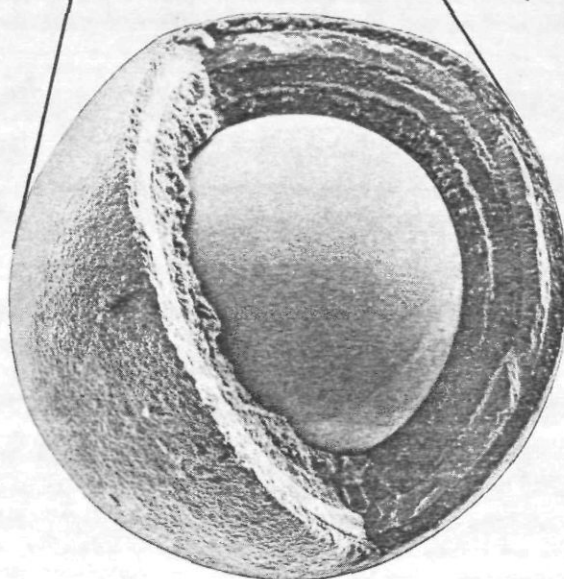
An diesem Brennelement kann nur die Anreicherung variiert werden. Zum Einsatz sollen aber nur niedrig angereicherte Brennelemente kommen (Low Enriched Uranium; LEU). Es können also Anreicherungen bis max. 20% gewählt werden.

Die Abb. 4 auf Seite 13 zeigt den prinzipiellen Aufbau von HTR-Brennelementen und die Abb. 5 auf Seite 14 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Spaltproduktfreisetzung.



Querschnitt durch ein Brennelement. Der Brennstoff ist auf bis zu 40.000 beschichtete Teilchen innerhalb der Graphitkugel verteilt.

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines aufgebrochenen beschichteten Teilchens. Der ca. 0,4 mm dicke Brennstoffkern ist von drei Pyrokohlenstoffschichten und einer Siliziumkarbidschicht umhüllt.



837656

Abb. 4. HTR-Brennelement einschließlich Coated Partikel

CS-137 RELEASE FROM AVR ELEMENTS (BISO)

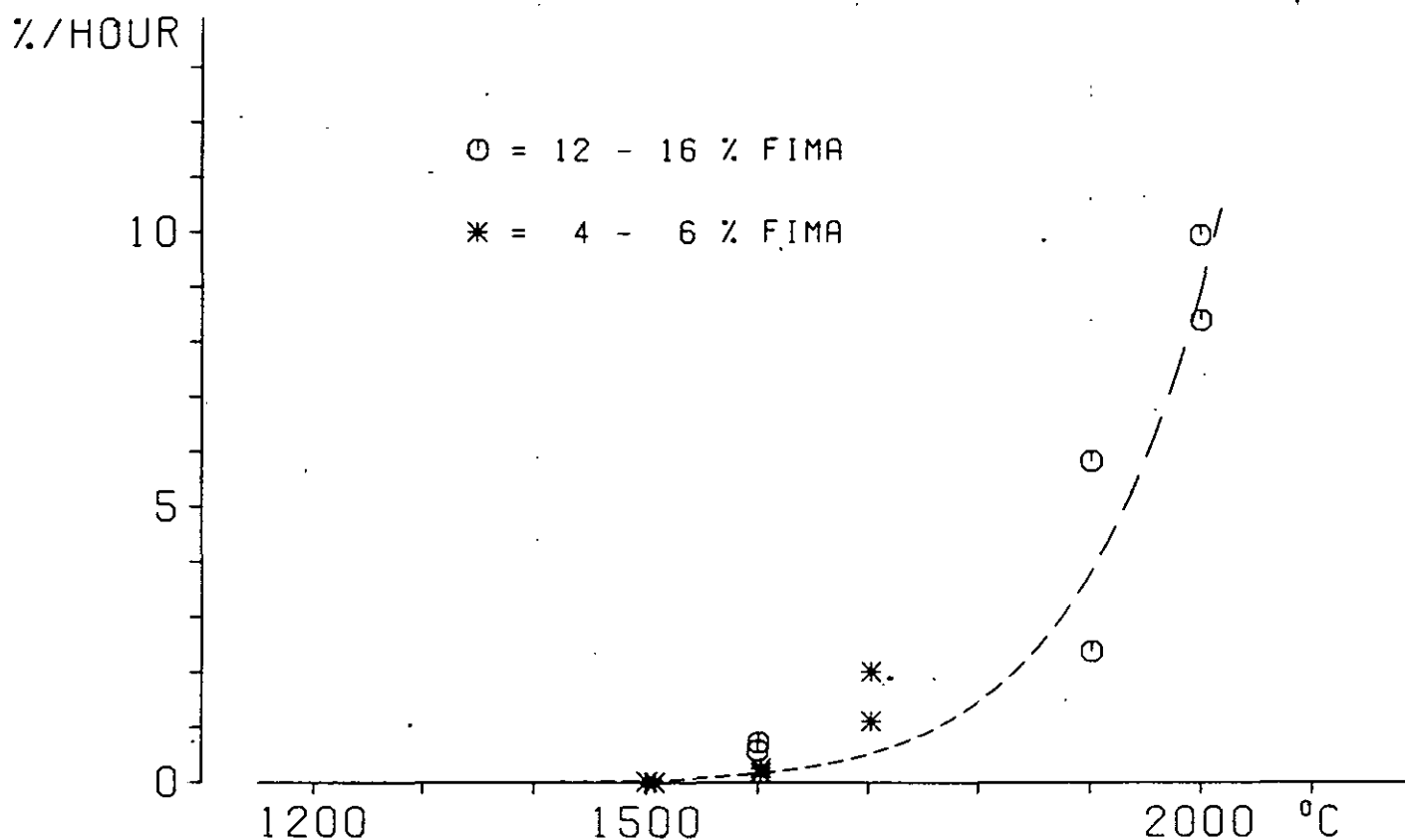


Abb. 5. Temperaturabhängigkeit der CS 137 Freisetzung

Es kann in dieser Arbeit nur kurz auf die Brennelemente eingegangen werden. Entscheidend für die guten Eigenschaften der Brennelemente ist: Erstens wirkt der Graphit, aus dem die Elemente hauptsächlich bestehen, außer als Moderator auch als Wärmekapazität und trägt dadurch dazu bei, daß bei Störfällen der Temperaturanstieg langsam vor sich geht, und daß deshalb die Möglichkeit besteht, Störfälle mittels passiver Wärmeabfuhr zu beherrschen. Zweitens bilden die einzelnen Schichten der Coated Partikel eine ausgezeichnete erste Barriere für die Spaltprodukte.

Die früher verwendeten Coated Partikel enthielten als druckfeste Hülle zwei Pyrokohlenstoffschalen (daher der Name BISO). Diese Coated Partikel wiesen schon wie die Abb. 5 zeigt eine sehr gute Rückhaltefähigkeit für Spaltprodukte auf. Diese

könnte aber verbessert werden durch das zusätzliche Einbringen einer dritten Schicht (TRISO) aus Siliziumcarbid.

2.2.3 Das Core

Die Form des Cores wurde schon erklärt. Es handelt sich um eine zylindrische Form mit glattem Boden. Die Simulation erfordert eine weitere Einteilung des Cores. Die Einteilung in Maschen ist in der Darstellung des Peu-à-Peu Reaktors Abb. 3 auf Seite 10 angedeutet. Beim Einfüllen der Kugeln in das Core durch einen Einlaß in der Mittelachse des Reaktors kann es nicht vollständig gefüllt werden, da sich auf dem Kugelhaufen ein Schüttungskegel ausbildet. Aus diesem Grund werden die oberen drei Maschen im Core als nicht zu füllender Hohlraum eingerechnet. Weiter wird der Einfluß des Schüttungskegels bei der Simulation nicht berücksichtigt.

Die noch verbleibende Corehöhe von 420 cm wird nun in 28 äquidistante Maschen a 15 cm eingeteilt. Der Coreradius von 150 cm wird in 4 volumengleiche Zonen eingeteilt. Die so entstandenen Maschen sind die kleinsten Einheiten, die von dem Simulationsprogramm angesprochen werden.

Unter Berücksichtigung dieses Maschennetzes soll nun das Grundcore aufgebaut werden.

Da dieses Referenzkonzept möglichst einfach gestaltet werden soll, wurde als erstes versucht, die Brennelemente des Grundcores sowie alle später nachzuladenden Brennelemente mit einer einzigen Anreicherung vorzusehen. Aus dieser Forderung ergaben sich einige Bedingungen für das Konzept:

Die gewählte Anreicherung soll so hoch sein, daß der angestrebte Abbrand von durchschnittlich 80 000 MWd/t erreicht werden kann. Das Grundcore wird recht klein ausfallen, wenn es schon dieselbe Anreicherung, wie sie in den nachzuladenden Schichten vorgesehen ist, erhält. Bei den früheren Peu-à-Peu Entwürfen wurde nämlich immer ein Grundcore etwa der halben Coregröße aufgebaut. Hierbei hatte dann das Grundcore nur eine halb so hohe Anreicherung wie die dann nachgeladenen Schichten.

Als erster Versuch wurde deshalb ein Grundcore mit der Höhe von 7 Schichten aufgebaut. Dies entspricht genau einem Viertel des gesamten Corevolumens.

Bei diesem Grundcore wurde dann solange die Anreicherung iterativ geändert, bis die Bedingung K_{eff} etwas größer als 1 erreicht war. Dies war bei der Anreicherung von 13.6% der Fall.

Es wurde dann untersucht, ob dieser Realisationsversuch schon allen Forderungen genügen würde: Dazu wurde ein gesamter Zyklus simuliert, also ausgehend von dem ge-

rade beschriebenen Grundcore bis zum vollgefüllten Reaktor, der dann bis zu Ende abgebrannt wurde. Der geforderte Abbrand wurde mit $88\,800\text{ MWd/t}$ deutlich überschritten.

Eine genaue Untersuchung des Grundcores aber zeigte dann, daß die Zentraltemperatur der Brennelemente in der Coremitte nahe dem Coreboden mit 1332.2 °C deutlich über der Grenztemperatur von 1250 °C lag (siehe dazu Abb. 6 auf Seite 19 Grundcore A).

Diese hohe Temperatur ist das Ergebnis einer Summe von Einflüssen:

Die hohe Leistungsdichte in dem kleinen Grundcore führt zu einem sehr großen Temperaturgradienten innerhalb der Kugeln. Dazu kommt noch, daß die Brennelemente, die an der heißesten Stelle des Cores liegen, auch noch viel Leistung erbringen, denn sie liegen direkt auf dem Bodenreflektor, wo durch den Reflektoreffekt der thermische Fluß erhöht ist.

Dies zusammen führt zu der sehr hohen Temperatur. Man kann wegen der Vielzahl der auslösenden Gründe erwarten, daß es viele verschiedene Möglichkeiten gibt, diese Temperatur zu senken. Einige dieser Möglichkeiten wären: 1. Die Form des Reaktorbodens umzugestalten, z.B. durch einen in das Core gewölbten Boden. 2. Die Reflektorwirksamkeit an dieser Stelle zu verschlechtern, oder 3. In der Einbrennphase mit reduzierter Leistung den Reaktor zu betreiben, da auch nur in dieser Phase die Temperaturerhöhung auftritt.

Da der Reaktor aber möglichst einfach und auch als Basisreaktor ausgeführt werden sollte, wäre es ungünstig gewesen, schon bei der ersten Auslegung wichtige Temperaturwerte durch spezielle Maßnahmen unter den physikalischen Grenzwerten zu halten. Aus diesen Gründen wurde folgender Weg gewählt:

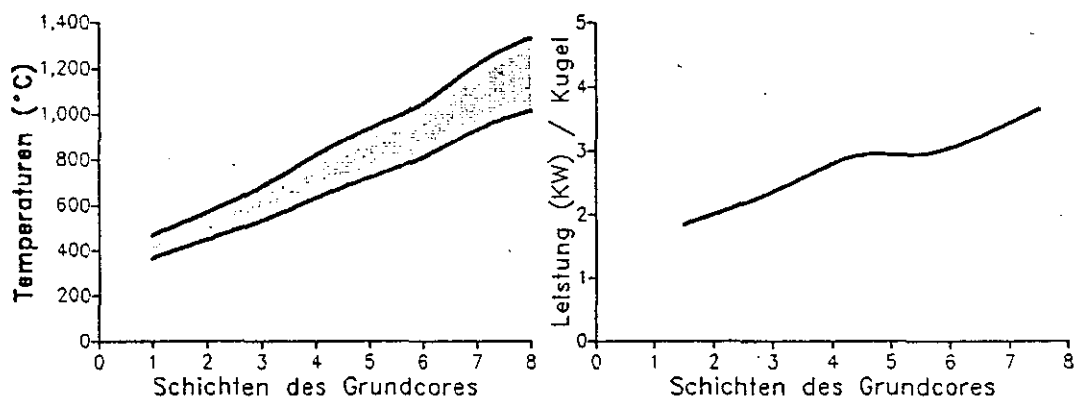
Das Grundcore wird um eine Schicht vergrößert. Hieraus folgt, daß man die Anreicherung des Grundcores verringern muß. Um die Temperaturerhöhung am Coreboden zu beseitigen, wird ferner ein Grundcore mit zwei achsialen Schichten gewählt. Es sollte in den unteren Schichten eine geringere Anreicherung haben und in den oberen Schichten eine Anreicherung, mit der der Reaktor auch aufgefüllt werden kann. Um den geforderten Abbrand zu erreichen, muß oben eine Anreicherung von ca. 13 % gewählt werden; das erste Core erreichte ja mit 13,6 % einen schon zu hohen Abbrand. Die Tab. 2 zeigt die verschiedenen nach diesen Überlegungen realisierten Grundcorevarianten.

Schichten im Grundcore				
Gesamt	Anreicherung	k_{eff}	max. Temp. (°C)	Nummer
7	7 a 13.6%	1.011	1332	A
8	5 a 13.5% 3 a 8%	0.990	1158	B
8	5 a 13% 3 a 9%	0.998	1194	C
8	6 a 14% 2 a 6%	0.996	1064	D
8	6 a 13% 2 a 8%	1.011	1147	E

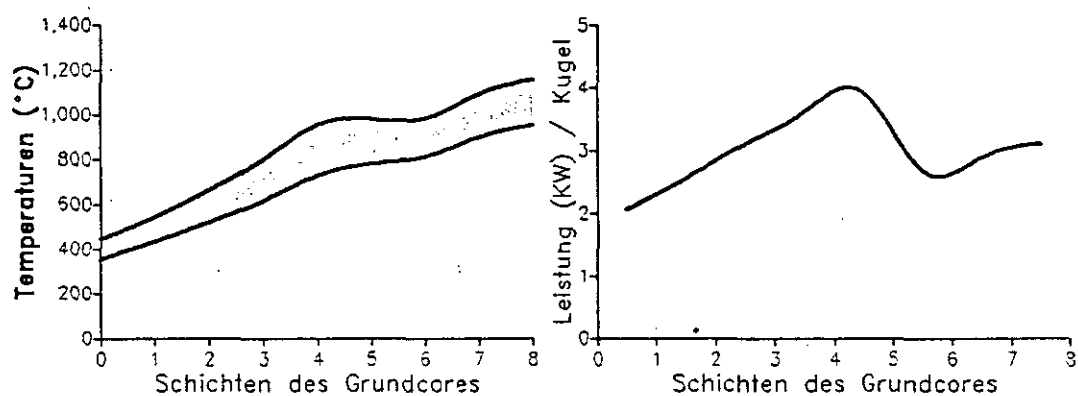
Tab. 2: Verschiedene Grundcorevarianten

Die Abb. 6 auf Seite 19 zeigt die verschiedenen sich ergebenden Temperatur- und Leistungsverläufe. Es sollte nun ein Grundcoretyp mit einem Temperaturverlauf gewählt werden, bei dem ein ausreichender Abstand von der krit. Temperatur sichergestellt ist, und zusätzlich sollte der dazugehörige Leistungsverlauf über die Corehöhe nicht zu schwankend sein.

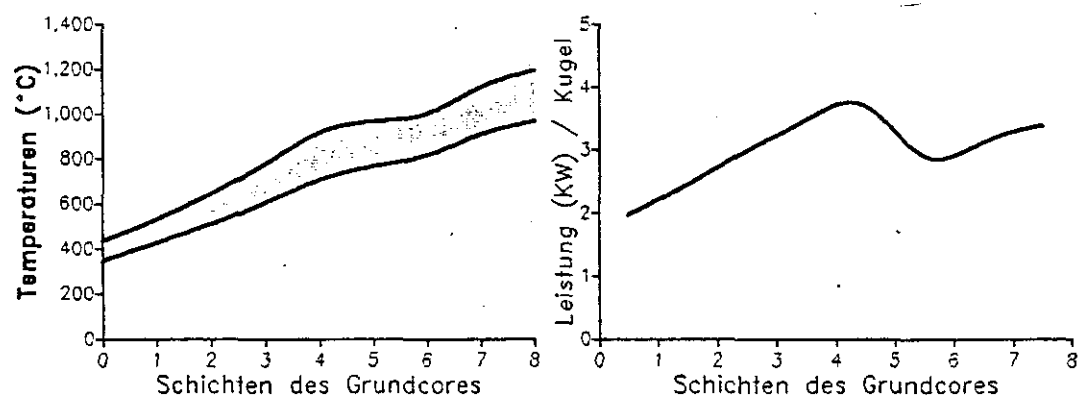
Aus diesen Gründen wurde für die weitere Verwendung das Grundcore E ausgewählt.



Grundcore A



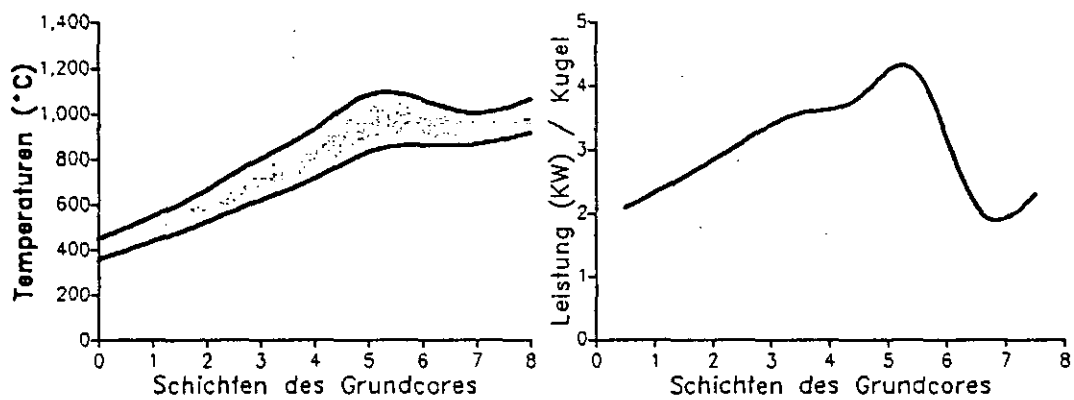
Grundcore B



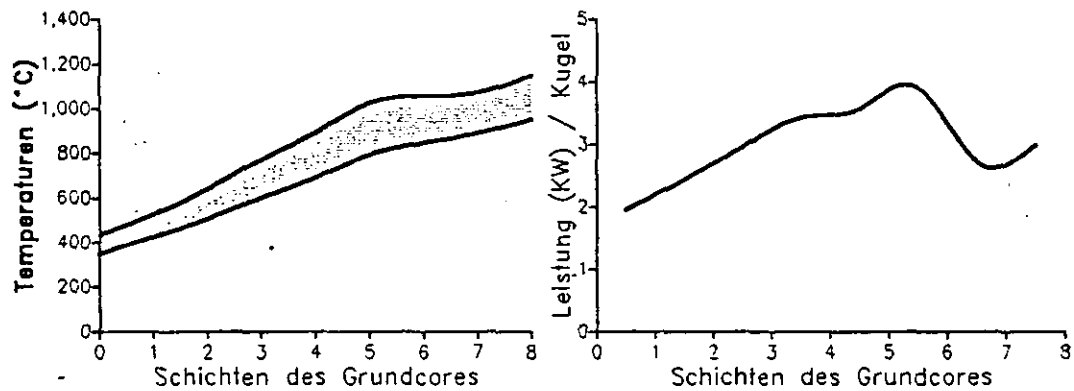
Grundcore c

Fortsetzung der Abbildung nächste Seite

Fortsetzung der Abb. von der Seite vorher



Grundcore d



Grundcore E

Abb. 6. Temperatur- und Leistungsverläufe der verschiedenen Grundcoretypen

2.3 Betriebsverhalten des Reaktors

Ein alle Forderungen erfüllendes Grundcore ist die Basis eines Peu-à-Peu Reaktors. Die weiter benötigten Brennelemente werden dann entsprechend dem Fortschreiten des Abbrandes auf die sich schon im Core befindlichen Brennelemente aufgeladen. Durch den zunehmenden Füllungsgrad des Reaktors ändern sich, wie schon erwähnt, die Leistungs- und die Temperaturverteilung, und es ergibt sich durch die unterschiedlichen Standzeiten im Reaktor ein unterschiedlicher Abbrand der Brennelemente. Diese Punkte werden in diesem Kapitel noch ausführlicher behandelt.

Zuerst aber sollen zwei Punkte angesprochen werden, die beim Befüllen des Cores beachtet werden müssen. Die Regelstäbe dieses Reaktors können wegen des sich verändernden Füllungsstandes nicht an einer Position belassen werden. Sie müssen sich dem Ansteigen der Füllung anpassen. Sie sollen bei jedem Füllungsstand so stehen, daß sie eine Leistungsänderung von ca. 50 % bewirken können. Sie müssen daher immer eine Reaktivität von ca. 1 % vorhalten.

Des weiteren hat die Veränderung der Temperaturverhältnisse direkt Einfluß auf das nukleare Verhalten des Reaktors. Das bedeutet, daß die Temperaturen während des Auffüllens immer wieder korrigiert werden müssen. Da aber zu der Ermittlung der aktuellen Temperaturen eine sehr rechenzeitintensive THERMIX-Rechnung durchgeführt werden muß, ist es nötig, diese Berechnungen hinreichend oft, aber auch nur in einem wirklich notwendigen Maß durchzuführen.

Die zu diesen beiden Punkten gehörenden Überlegungen und Ergebnisse werden in den folgenden Unterpunkten dargestellt.

2.3.1 Auffüllen des Cores mit Brennelementen

2.3.1.1 Position der Regelstäbe

Die Regelstäbe werden in diesem Programm mittels einer Borvergiftung eines Bereiches des innersten Seitenreflektors simuliert. In früheren Arbeiten ist dazu ermittelt worden, wie groß der Borgehalt in dieser Reflektorschicht sein muß, um denselben Effekt auf die Reaktivität zu bewirken, wie ihn sechs Regelstäbe, die sich in diesen Reflektor bewegen würden, hätten.

Um eine genaue Position der Stäbe realisieren zu können, wurde die innerste Reflektorschicht in genau dieselben axialen Schichten eingeteilt wie das Core. Die Regelstäbe müssen im Betrieb eine Wirksamkeit auf die Reaktivität von 1 % haben. Es wurden also dann die Stabpositionen, die diese Bedingung erfüllen, sowohl für das Grundcore, als auch für das Vollcore ermittelt. Hierbei ergab sich, daß beim Grundcore

die Stäbe 13 axiale Schichten tief in den Seitenreflektor hineinragen müssen. (Hier wird der nicht zu füllende Hohlraum mitgerechnet. 13 Maschen würden also einer Länge von 195 cm vom Deckenreflektor ins Core entsprechen.) Interessant ist, daß das Grundcore allein durch Stäbe geregelt werden kann, die sich im Reflektor seitlich des Hohlraumes über dem Core befinden. Beim Vollcore ist die ideale Stabposition 3 Schichten im Reflektor. Sie befinden sich dann gerade oberhalb der Corefüllung.

Damit bleiben 8 Schichten Differenz, die die Stäbe während des Auffüllens hochgesetzt werden müssen. Da 20 Schichten mit Brennelementen auf das Grundcore gefüllt werden, wurde folgendes Stabanhebschema gewählt: Viermal werden die Regelstäbe nach dem Aufladen von je drei Schichten eine Position nach oben gezogen, danach werden sie nach dem Aufladen von je zwei Schichten eine Position nach oben bewegt.

Dieses Fahrschema für die Regelstäbe gewährleistet die Regelbarkeit des Reaktors zu allen Zeitpunkten des Auffüllens.

2.3.1.2 Thermixrechnung

In diesem Kapitel soll einmal auf die Schwierigkeiten, welche durch die zwangsläufigen Vereinfachungen durch die Simulation entstehen können, an einem wichtigen Beispiel eingegangen werden.

Die Brennelemente werden immer in Chargen zugeladen; es wird nämlich immer eine komplette horizontale Schicht vollgeladen. Hierdurch werden die nuklearen Gegebenheiten im Core stark geändert. Deshalb wird nach jedem dieser Aufladungsschritte eine neue Spektral- und Diffusionsberechnung durchgeführt. Zusätzlich ändert sich aber auch die Temperaturverteilung im Reaktor. Da alle nuklearen Vorgänge stark temperaturabhängig sind, sollten die Temperaturen möglichst genau in den anderen Rechnungen erfaßt werden. Da die THERMIX Rechnung, die die genaue Temperaturverteilung im Core ermittelt, sehr rechenzeitintensiv ist (ca. 10 CPU Minuten) wird diese normal nicht nach jeder Aufladung einer Schicht durchgeführt, sondern erst, wenn jeweils drei Schichten aufgeladen worden sind.

Dieses Vorgehen stellt somit eine Näherung dar, deren Qualität bewertet werden muß. Die Überlegungen sind die: eine etwas fehlerhafte Temperaturverteilung bedingt dann auch eine fehlerhafte Leistungsverteilung und damit auch fehlerhaften Abbrand. Die Rückkopplung über den Abbrand ist nun, daß der Abbrand auf die Temperatur so einwirkt, daß die früheren Fehler zu einem großen Teil kompensiert werden.

Um dieses zu bestätigen, wurde nun die folgende Kontrollrechnung durchgeführt. Ergänzend zu der normalen Berechnung der Auffüllung, bei der nur nach drei Schichten THERMIX gerechnet wird, wurde hier für die ersten sechs aufzuladenden Schichten eine Vergleichsrechnung gemacht, die auch sechs THERMIX Rechnungen beinhaltet. Die Abb. 7 auf Seite 22 stellt die Ergebnisse dieser Rechnungen dar.

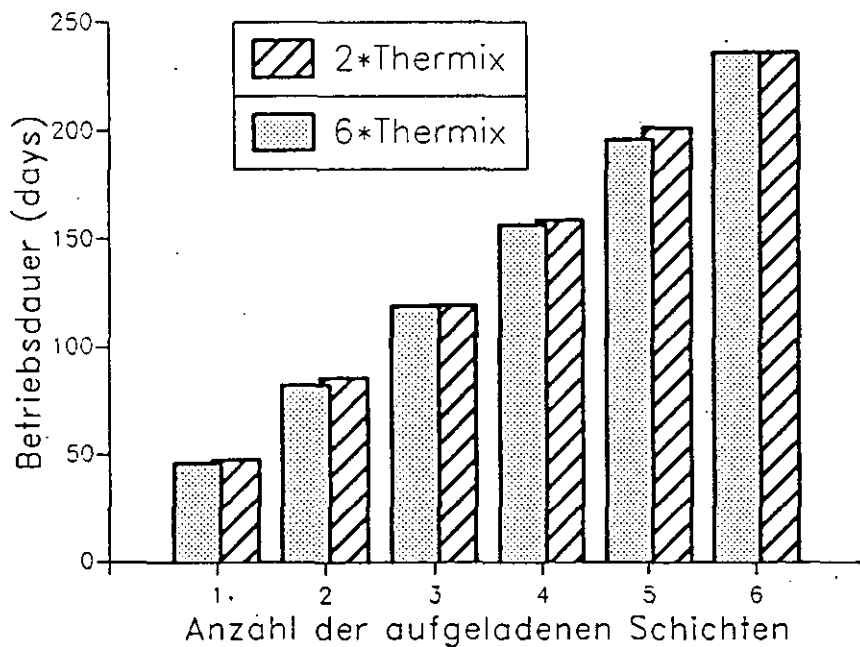


Abb. 7. Gegenüberstellung unterschiedlich häufig wiederholter Temperaturrechnungen

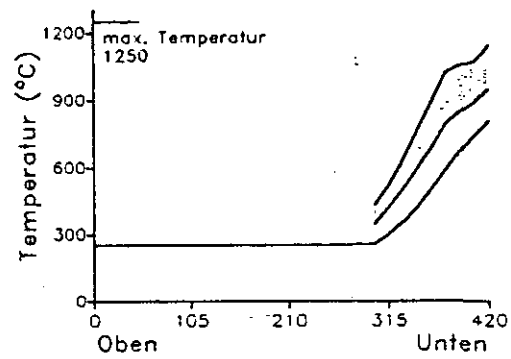
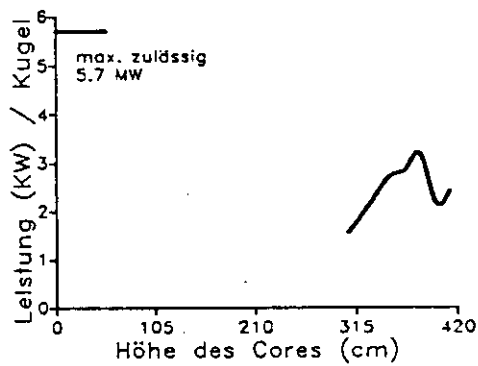
In dieser Abb. werden jeweils die benötigten Abbrandzeiten, immer vor dem Aufladen der nächsten Schicht, der zwei Rechnungen gegenübergestellt. (Die Höhendifferenz der sich berührenden Balken stellt die Abweichungen der zwei verschiedenen Berechnungsmethoden dar.) Es zeigt sich, daß die Abbrandzeiten größer werden, wenn keine THERMIX-Rechnungen durchgeführt werden, daß aber diese Differenz bei den Aufladungen 3 und 6, zu denen bei beiden Verfahren THERMIX gerechnet wird, wieder fast vollständig verschwindet. Dies zeigt, daß die oben besprochene Theorie richtig ist und daß die Fehler, die durch den Verzicht auf eine ständige THERMIX Rechnung auftreten, vernachlässigbar klein sind.

2.3.2 Leistungs- und Temperaturverteilung

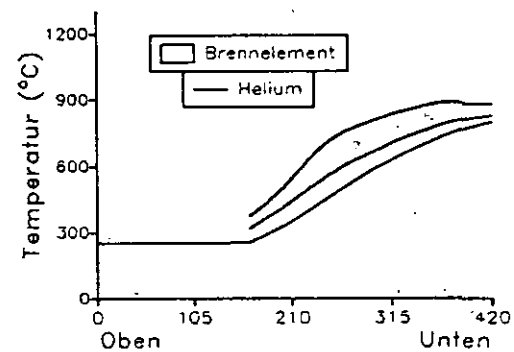
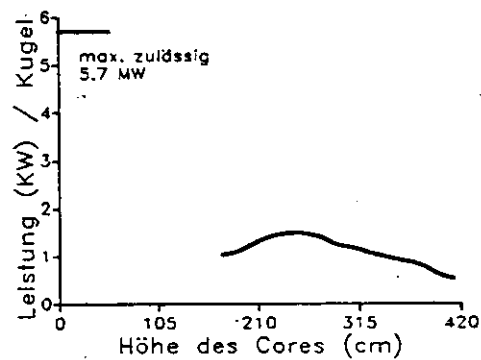
Mehrfach ist in dieser Arbeit schon auf die Tatsache hingewiesen worden, daß die Leistungs- und Temperaturverteilung des Peu-à-Peu Reaktors hauptsächlich von dem Füllungsgrad des Reaktors abhängt. Andere Einflußgrößen auf diese Verteilung, wie etwa

monentane Leistungsschwankungen oder Veränderungen der Abbrandverteilung, sind in erster Linie vom Füllungsgrad abhängig und vernachlässigbar klein.

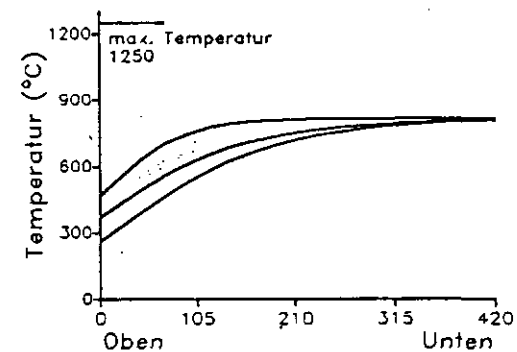
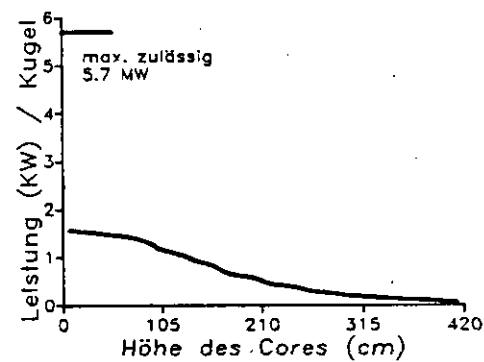
Der Füllungsgrad ist somit die entscheidende Größe des Reaktors. Deshalb zeigt die Abb. 8 auf Seite 24 die Leistungs- und Temperaturverteilung des Reaktors zu drei verschiedenen Füllungszuständen.



Grundcore



Halbcore



Vollcore

Abb. 8. Leistungs- und Temperturverteilung zu 3 Füllungszuständen

Als Daten zur Erstellung dieser Abbildung wurden immer die Maximalwerte aus der Reaktormittelachse verwendet. Es werden folgende Temperaturverläufe dargestellt: einmal der Temperaturverlauf des Kühlgases Helium und dann die Temperturspanne in den Brennelementen (Maximalwert: die Zentraltemperatur; Minimalwert: die Oberflächen-temperatur).

Die Abbildung zeigt, daß der Reaktor in diesen drei charakteristischen Zuständen Leistungs- und Temperaturverläufe aufweist, die anschaulich machen, daß von dieser Seite her keine Schwierigkeiten bei der Realisierung dieses Peu-à-Peu Reaktors bestehen.

Bei der Untersuchung der Kurvenverläufe des Grundcores muß noch einmal erwähnt werden, daß das Grundcore der Zustand des Reaktors ist, bei dem man den vorgegebenen Grenzen am nächsten kommt.

Hieraus folgt, daß bei einer Optimierung des Reaktors in Richtung Leistungserhöhung und damit auch Kostenoptimierung eine Veränderung am Grundcore vorgenommen werden müßte, so daß eine Leistungserhöhung möglich würde. Solche Verbesserungs-ideen sollen im letzten Teil dieser Arbeit angesprochen werden, und es müssen für diese erst noch die Ergebnisse des Störfallverhaltens des Reaktors berücksichtigt werden.

2.3.3 Die Abbrandverteilung

Da dieser Reaktor keine Zirkulierung des Kugelbettes hat, stellt sich eine ortsabhängige Abbrandverteilung ein. Diese Abbrandverteilung ist in der Abb. 9 auf Seite 26 dargestellt. Der Reaktor erreicht also mit dem Mittelwert 80600 MWd/t den geforderten Abbrand von 80000 MWd/t. Die große Schwankung im Abbrand ist bei einem Reaktor mit diesem Beschickungsschema typisch. Die Abbrandüberhöhung im unteren Bereich des Reaktors stellt kein Problem dar, da die Brennelemente, wie die langjährigen Versuche im AVR-Reaktor gezeigt haben, Abbrände bis zu 180000 MWd/t vertragen können.

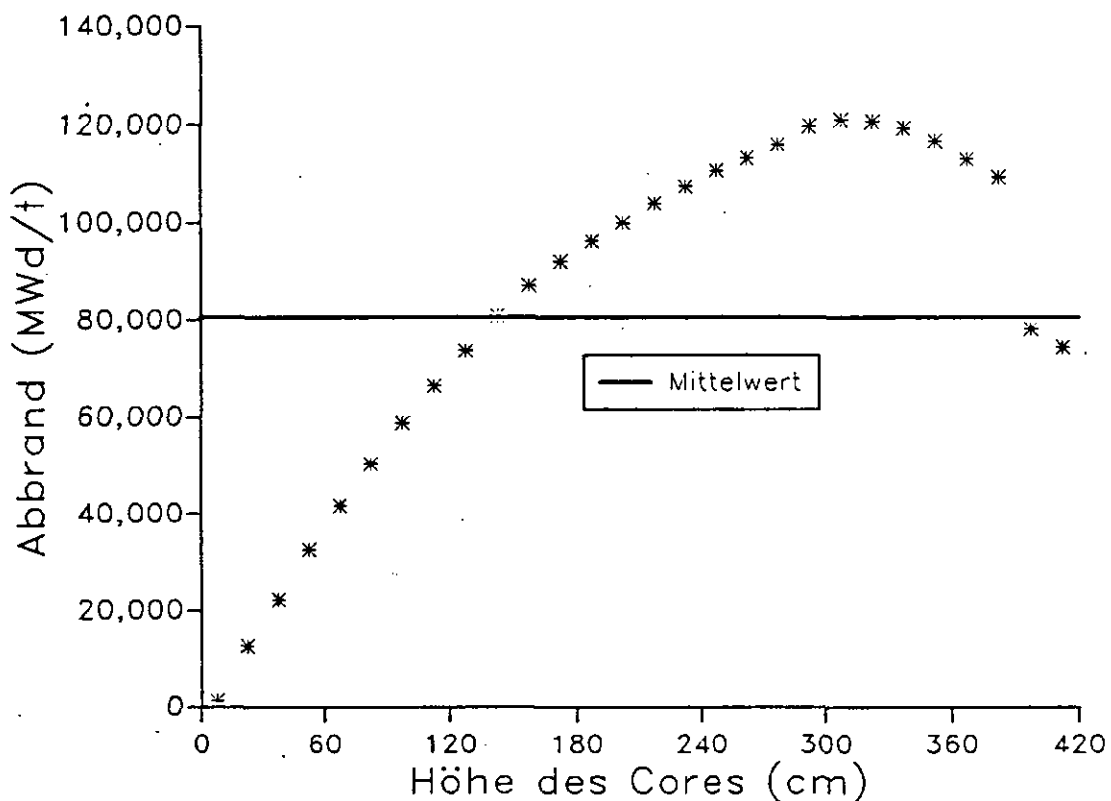


Abb. 9. Abbrandverteilung des Peu-à-Peu Reaktors

Aus Kostengründen dagegen ist der nur geringe Abbrand der zuletzt zugeladenen Brennelemente als Verlust zu sehen, der einen hohen Anteil an den vergleichsweise hohen Brennstoffzykluskosten des Peu-à-Peu Reaktors hat. Deshalb soll bei den Verbesserungsideen zu diesem Reaktor versucht werden, einen Teil der zuletzt zugeladenen Brennelemente zum Aufbau des nächsten Grundcore zu verwenden. Es besteht die Hoffnung, durch eine solche Maßnahme alle Brennelemente ökonomisch abzubrennen.

2.4 Störfallverhalten des Reaktors

Dieser Reaktor soll passiv sicher ausgelegt werden: er wird deshalb ohne aktive Nachwärmefuhrsysteme konzipiert. Nur der Flächenkühler, der mit 1.5 m Abstand den Reaktordruckbehälter umgibt, wird bei der Simulation auf die Temperatur von konstant 50° C gehalten. Die Sicherheitsforderungen bedeuten für die Störfallbetrachtung, daß die Temperatur des Reaktors unter ca. 1600 °C, bei der die Brennelemente die Spaltprodukte noch zurückhalten können, bleiben muß.

Zuerst stellt sich damit die Frage, welcher Störfall unter diesen Bedingungen untersucht werden muß:

Wenn die Forderung nach der Begrenzung möglicher Reaktivitätserhöhungen eingehalten wird, ist mittels der negativen thermischen Rückkopplung die nukleare Abschaltung unter allen Bedingungen durch physikalische Gesetze gewährleistet. Mit der Rekritikalität ist wegen des Xenon-Aufbaus im Reaktor erst bei Temperaturen, die deutlich tiefer als die eigentlichen Betriebstemperaturen liegen, zu rechnen. Die Rekritikalität würde erst nach dem eigentlichen Störfallgeschehen auftreten und auch zu geringeren als den ursprünglichen Leistungswerten führen. (Dieses Verhalten wurde mit dem "Vier-Stab-Klemmversuch" an dem AVR in einem Versuch nachgewiesen.) Die Rekritikalität wird deshalb hier nicht gesondert untersucht. Aus diesem Grund braucht man sich jetzt nur auf nicht nukleare Nachwärmestörfälle zu beschränken. Die in den Brennelementen entstehende Nachwärme wird durch Wärmeleitungs- und Strahlungsvorgänge abgeleitet. Hierbei stellt sich im Core dann Naturkonvektion ein, die für die Wärmeabfuhr bestimmend ist. Der Reaktor hat einen Heliumbetriebsdruck von 40 bar. Die Wärmeabfuhr würde weiter erschwert, wenn beim Störfall zusätzlich noch Druckentlastung auftreten würde, denn die Wirksamkeit dieser Konvektion ist von dem Druck des Gases abhängig. Je geringer der Druck ist, desto schlechter ist die Wärmeabfuhr durch die Konvektion. Damit ist die passivste Annahme für den Nachwärmestörfall eine Druckentlastung auf Umgebungsdruck.

Die Abb. 10 auf Seite 28 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Störfalltemperatur.

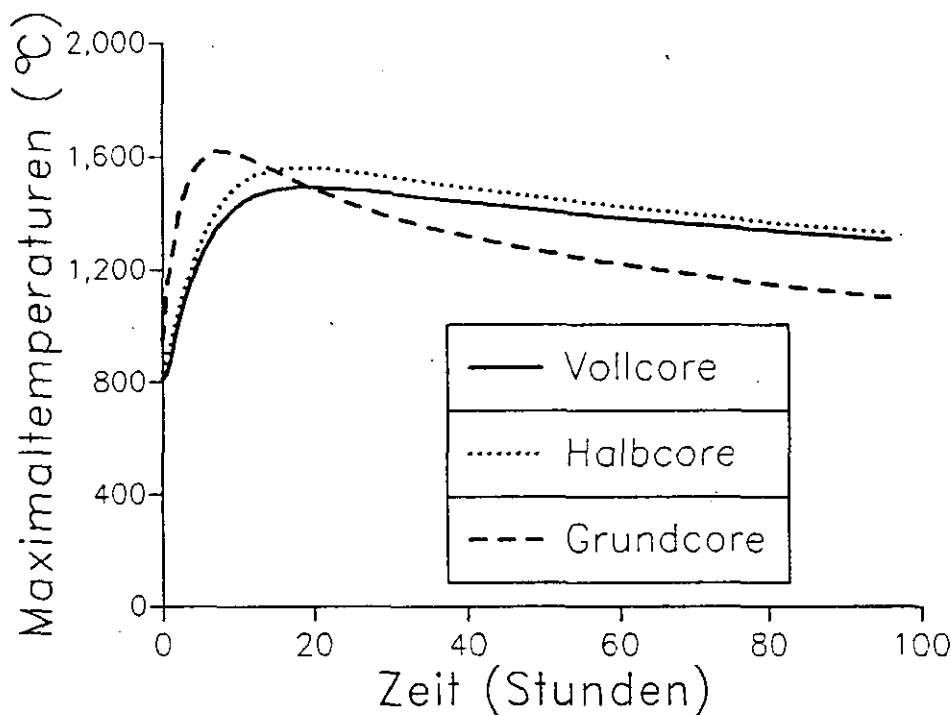


Abb. 10. Zeitlicher Verlauf der Störfalltemperatur zu 3 Füllungsgraden

Es muß jetzt noch genau definiert werden, was unter Grundcore, Halbc core und Vollcore zu verstehen ist. Mit Grundcore ist hier das Grundcore plus eine Schicht Zuladung gemeint. Es ist nämlich erst dann sinnvoll, die Störfallrechnung durchzuführen, wenn durch die Bildung der Spaltprodukte die Nachwärmeleistung so hoch ist, daß sie schon voraussichtlich zu hohen Temperaturwerten im Grundcore führt. Das Halbc core ist dann definiert, wenn genau die Hälfte (10) der aufzufüllenden Schichten ins Core eingebracht ist und das Vollcore, wenn der Reaktor gefüllt ist.

Die Kurvenverläufe der Abb. 10 zeigen, daß das Grundcore die höchste Nachwärmtemperatur erreicht. Dies ist aus dem Grund der Fall, weil auch die Leistungsdichte im Grundcore am größten und deswegen auch die spezifische Nachwärme im Grundcore und damit auch die Störfalltemperatur am höchsten ist.

Da die Zeitpunkte für die Störfallrechnungen zu den drei charakteristischen Reaktorfüllungszuständen gewählt wurden, ist noch nicht sichergestellt, daß auch schon die max. Störfalltemperatur gefunden worden ist. Deshalb muß jetzt noch die Veränderung bei weiterer Auffüllung auf das Grundcore untersucht werden.

2.4.1 Die maximale Störfalltemperatur

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß die höchste Temperatur im Grundcore auftritt. Da aber der Zeitpunkt für die Störfallberechnung und damit der Füllungsgrad des Reaktors nicht so gewählt werden konnte, daß gleich die max. Störfalltemperatur ermittelt wird, muß diese durch weitere sinnvolle Untersuchungen bestimmt werden. Dazu müssen jetzt Störfallberechnungen zu den auf die Grundcorestörfallrechnung folgenden Zeitpunkten durchgeführt werden, bis die max. Temperatur gefunden ist. Die Abb. 11 zeigt die sich ergebenden Temperaturverläufe für die ersten drei auf das Grundcore geladenen Schichten. Da sich in dieser Darstellung die Kurven an der interessantesten Stelle, der höchsten Temperatur, fast nicht unterscheiden, ist dieser Bereich in der Abb. 12 auf Seite 30 noch einmal größer dargestellt.

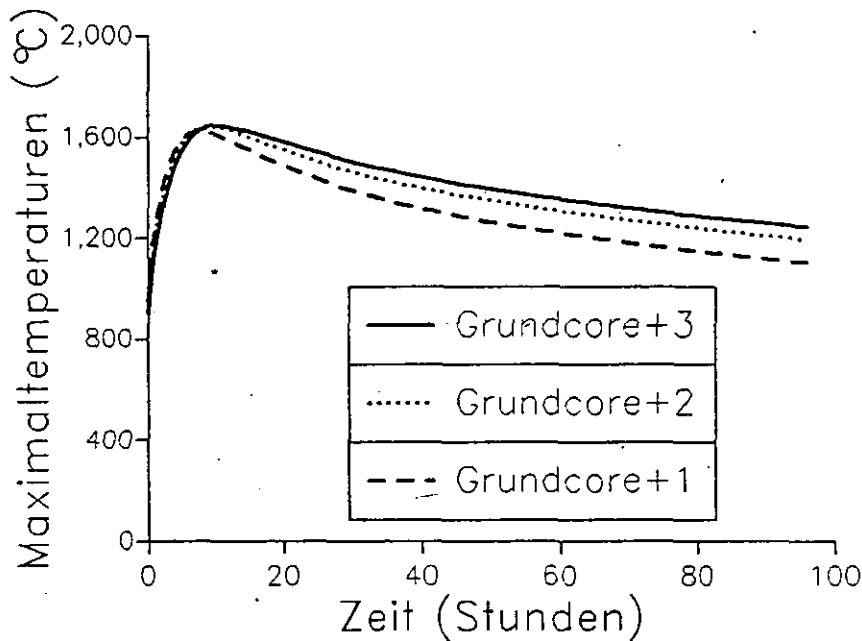


Abb. 11. Störfalltemperaturen beim störfallmäßig krit. Füllungsgrad

Die Zeitpunkte dieser Störfallrechnungen, jeweils vom Zyklusbeginn aus gerechnet, sind: 47.1 h für das Grundcore+1, 85.2 h für das Grundcore+2 und 118.9 h für das Grundcore+3.

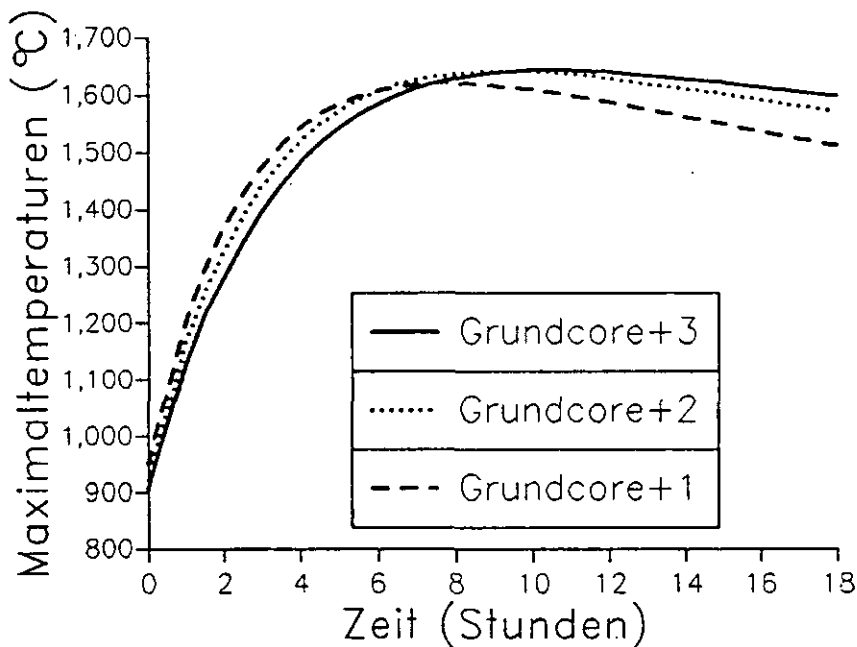


Abb. 12. Ausschnittsvergrößerung der letzten Abb.

Auf der Ausschnittsvergrößerung kann man erkennen, daß die Störfalltemperatur sich nicht mehr erhöht von Grundcore+2 zu Grundcore+3. Sie verschiebt sich lediglich etwas zu einem späteren Zeitpunkt. Man kann deshalb annehmen, daß mit der Temperatur von ca. 1640 °C die max. Störfalltemperatur erreicht worden ist. Damit ist nachgewiesen, daß das Kriterium der passiven Sicherheit auch von diesem Reaktor eingehalten werden kann, denn die Störfalltemperaturen bleiben im Bereich der geforderten ca. 1600° C.

Es muß noch einmal auf die Besonderheit des Peu-à-Peu Reaktors hingewiesen werden. Bei diesem Reaktor ist die maximale Störfalltemperatur auch von dem Füllungsgrad des Reaktors abhängig. Es ist somit die Suche nach dem krit. Füllungsgrad notwendig.

Auch bei der Störfallbetrachtung stellt sich das Grundcore als der Zustand des Reaktors heraus, bei dem er den physikalischen Grenzwerten am nächsten kommt (vgl. Abb. 10).

2.4.2 Räumliche Darstellung der Temperaturverteilung

Die Simulation liefert ein so dichtes Temperaturnetz des Reaktors, daß sich diese Ergebnisse sehr gut für eine dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung eignen.

Es soll daher die Temperaturverteilung im Reaktor zu den drei Füllungsstadien bei jeweils dem kritischen Störfallzeitpunkt dargestellt und dann im weiteren ein zeitlicher Verlauf eines Störfalles dargestellt werden.

2.4.2.1 3D Bilder von den krit. Störfallzeitpunkten

Die jetzt folgenden Abbildungen zeigen die zweidimensionale Temperaturverteilung zu den drei charakteristischen Füllungsständen des Reaktors. Dabei ist für das Grundcore der Fall dargestellt, bei dem die Maximaltemperatur festgestellt worden ist. Die Abbildungen zeigen das System der passiven Wärmeabfuhr deutlich auf. Im Bereich der Brennelemente sind die Temperaturen am höchsten. Bei diesen Bereichen sieht man an den großen Temperaturgradienten, daß die Wärmeströme am Übergang vom Core zum Reflektor und an der Oberfläche der Schüttung am größten sind.

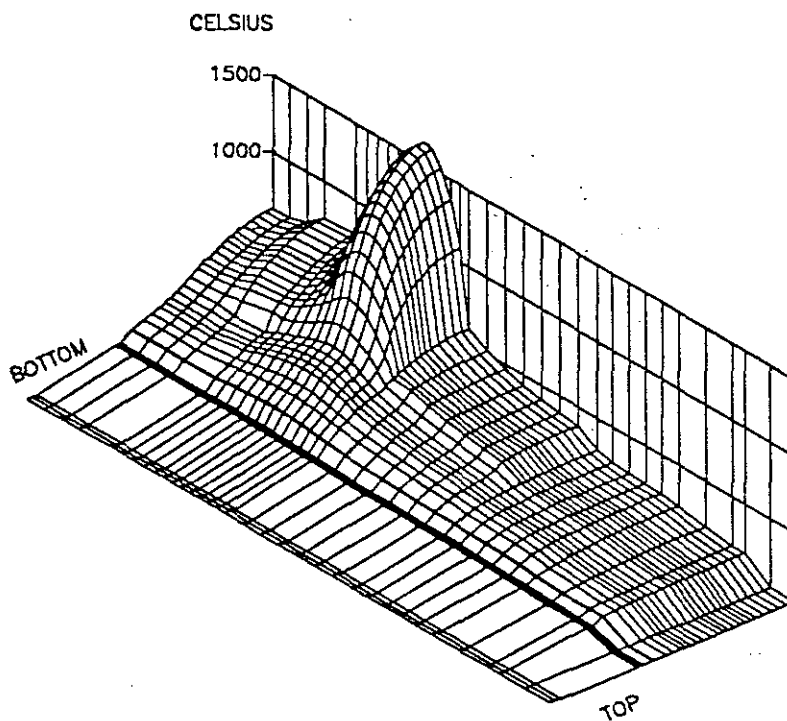


Abb. 13. 2 Dimensionale Störfalltemperaturverteilung des Grundcores

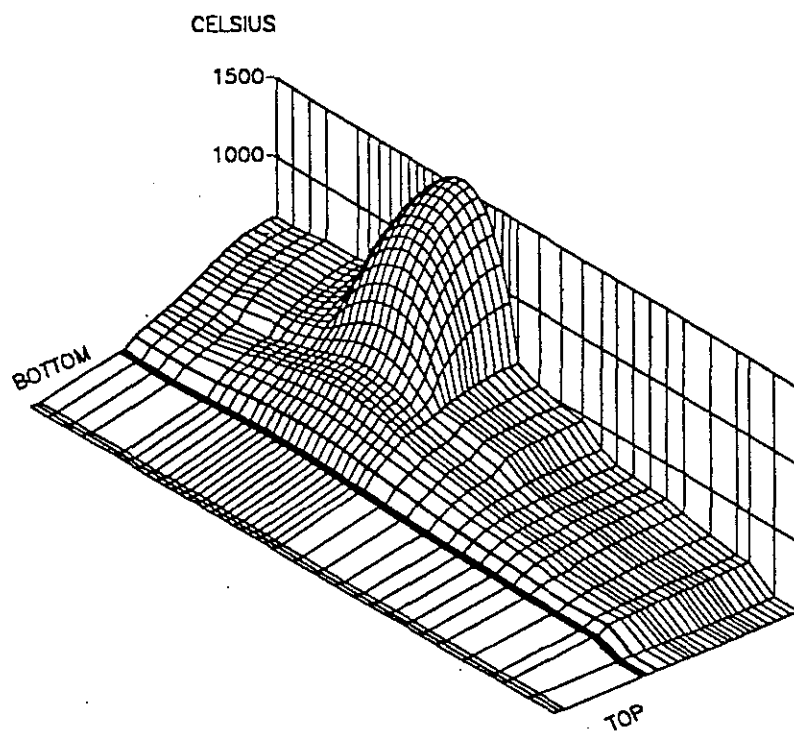


Abb. 14. 2 Dimensionale Störfalltemperaturverteilung des Halbcores

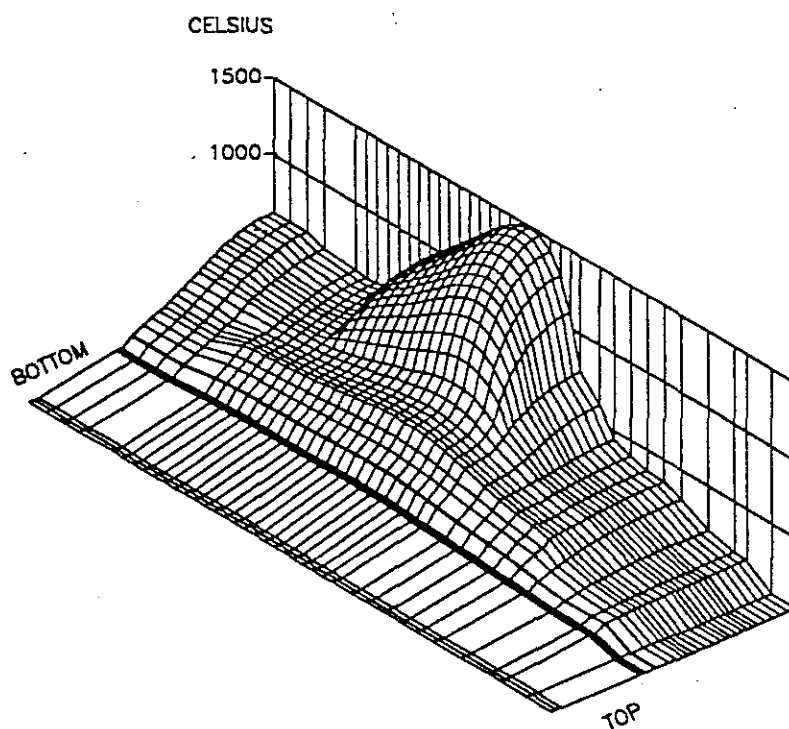


Abb. 15. 2 Dimensionale Störfalltemperaturverteilung des Vollcores

Im Vollcore befindet sich das Maximum der Temperatur im oberen Bereich der Kugelschüttung, da die Wärmequellverteilung proportional zur asymmetrisch nach oben verlagerten Leistungsverteilung ist. (vgl. Abb. 8)

2.4.2.2 3D Bilder eines zeitlichen Störfallverlaufes

Diese folgenden 4 Abbildungen sollen nun den zeitlichen Verlauf eines Störfalles aufzeigen. Wieder wurde als Beispiel der kritischste Störfallverlauf des Grundcores gewählt.

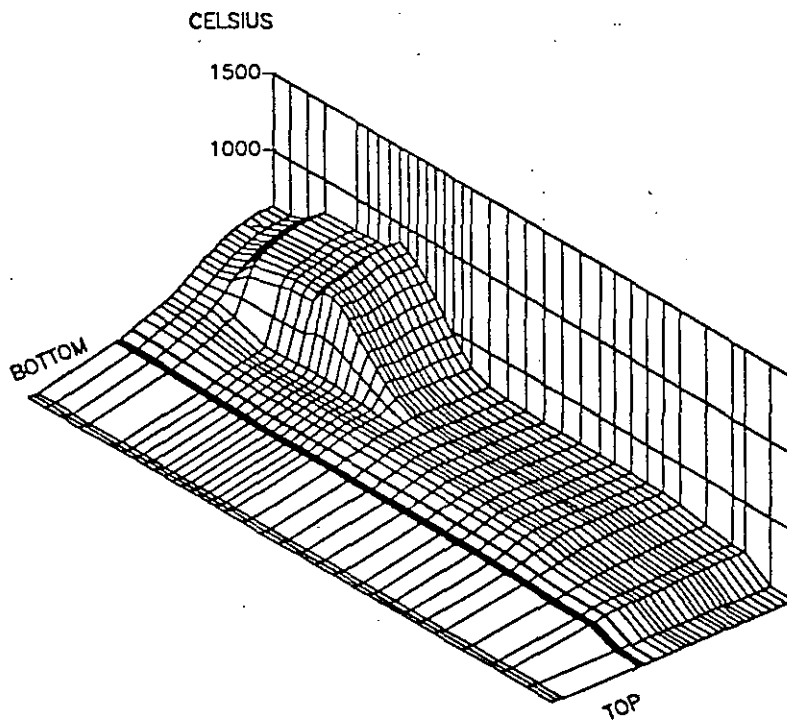


Abb. 16. Temperaturverteilung im Grundcore zum Beginn des Störfalles

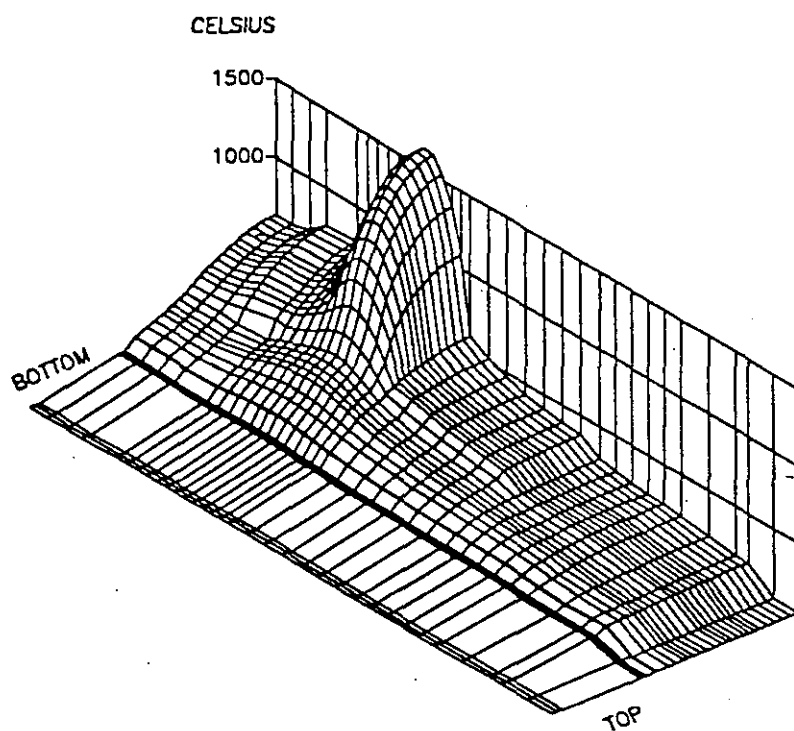


Abb. 17. Temperaturverteilung im Grundcore nach 18.5 h (Maximum)

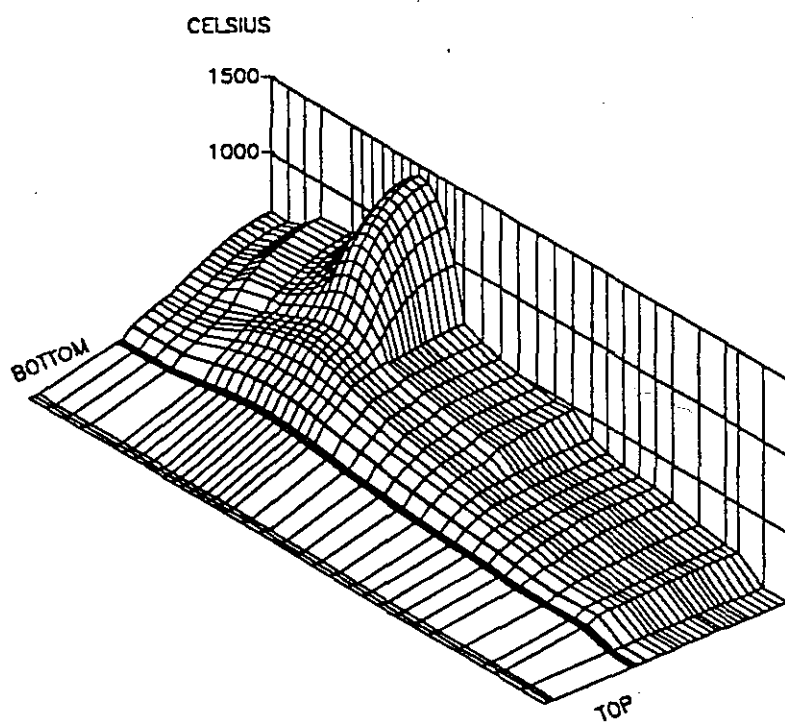


Abb. 18. Temperaturverteilung im Grundcore nach 42 h

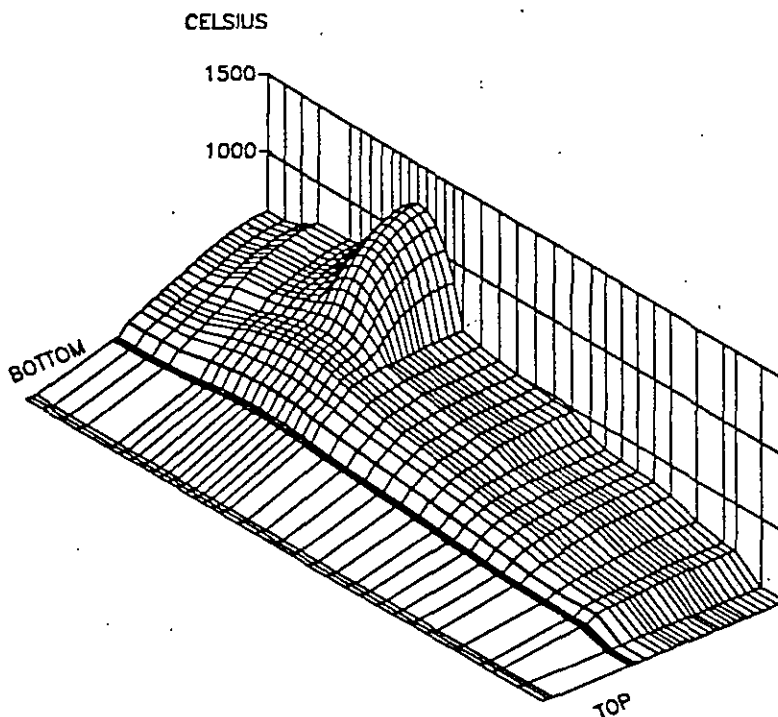


Abb. 19. Temperaturverteilung im Grundcore nach 94 h

Der große Temperaturunterschied zwischen dem Brennelementbereich und den umgebenden Reaktorkomponenten zeigt, wie schlecht die Wärmeabfuhr allein durch Leitung, Strahlung und Konvektion arbeitet. Hier sieht man ganz deutlich, daß der Hauptgrund, trotzdem passive Sicherheit zu gewährleisten, in der Eigenschaft der Brennelemente liegt, Temperaturen von 1600°C ohne Verlust der Spaltproduktrückhaltung zu vertragen.

3.0 Vergleich der Beschickungssysteme OTTO und Peu-à-Peu

In diesem Kapitel wird dem in dieser Arbeit vorgestellten Peu-à-Peu Reaktor ein Reaktor mit OTTO-Beschickung gegenübergestellt. Der Vergleich soll vor allem die Unterschiede, die sich aus den unterschiedlichen Beschickungssystemen ergeben, aufzeigen. Um diesen Vergleich so aussagekräftig wie möglich zu machen, wurden die Reaktortypen, die hier verglichen werden, exakt gleich ausgelegt. Es wurden nur Unterschiede, die sich zwingend aus den unterschiedlichen Beschickungssystemen ergaben, zugelassen.

Der OTTO-Reaktor wurde parallel zu dem Peu-à-Peu Reaktor (mit Hilfe eines Gastwissenschaftlers) konzipiert. Gerade dem gleichzeitigen Beginn der Untersuchungen zu den beiden Demonstrationskonzepten ist es zu verdanken, daß die weitgehende Übereinstimmung der beiden Reaktorauslegungen möglich war.

Als erstes wird jetzt ein kurzer Überblick über den OTTO-Reaktor gegeben, worauf dann der Vergleich der beiden Reaktortypen folgt.

3.1 Der OTTO-Reaktor

Der OTTO-Reaktor ist die einfachste Bauart eines kontinuierlich arbeitenden Kugelhaufenreaktors. Jeder Kernreaktor muß den eingesetzten Brennstoff ausreichend abbrennen, um wirtschaftlich arbeiten zu können. Die zuerst gebauten Kugelhaufenreaktoren (wie z.B. der AVR) lösen diese Aufgabe dadurch, daß der Abbrand der Brennelemente, die unten dem Reaktorcore entnommen werden, gemessen wird und das Ergebnis dieser Messung dann entscheidet, ob die Brennelemente über ein pneumatisches Fördersystem wieder oben auf die Kugelschüttung gegeben werden und erneut durch den Reaktor wandern oder direkt in die Entsorgung gegeben werden.

Die Idee bei OTTO ist nun, die Brennelemente so langsam durch den Reaktor wandern zu lassen, daß sie schon nach einem einmaligen Durchlauf den geforderten Abbrand erreichen. Es entfallen die Abbrandmessung und das pneumatische Transportsystem. Bestehen bleibt die trichterförmige Form des Corebodens, die die Brennelemententnahme bei Leistungsbetrieb ermöglicht. Da die beiden Referenzreaktoren in ihren geometrischen Abmaßen genau gleich ausgelegt wurden, ist der Bodenabzug des OTTO-Konzeptes auch der einzige bauliche Unterschied zum Peu-à-Peu Konzept.

Die Simulation wird genauso schichtweise durchgeführt wie auch bei dem Peu-à-Peu Reaktor, sogar mit genau der gleichen Schichtdicke. Bei einem Brennstoffwechselvorgang wird die unterste Schicht aus dem Reaktor entnommen, alle verbleibenden Schichten um eine Position nach unten versetzt und eine Schicht mit frischen Brennelementen oben nachgeladen.

3.1.1 Vom Anfangscore zum Gleichgewichtscore

Der OTTO-Reaktor ist ein Reaktor mit kontinuierlichem Leistungsbetrieb. Der Brennstoffwechsel erfolgt durch die Entnahme von Brennelementen aus dem Bodenabzug des Reaktors bei gleichzeitiger Zugabe von frischen Brennelementen oben auf das Kugelbett des Reaktors. Bei dieser Arbeitsweise des Reaktor stellt sich eine zeitlich konstante Leistungs- und Abbrandverteilung mit ausgeprägtem axialen Gradienten im Reaktor ein. Der Reaktor arbeitet im Gleichgewicht.

Wenn ein solcher Reaktor in Betrieb genommen wird, muß mit frischen Brennelementen, die sich nur in ihrer Anreicherung unterscheiden, dieser Gleichgewichtszustand möglichst gut nachgebildet werden, damit auch schon zu Beginn des Betriebes ähnliche Verhältnisse vorliegen wie im Gleichgewichtszustand.

Der Reaktor wird dann mit dieser Anfangsfüllung gestartet und verändert sich mit jedem Brennstoffwechsel mehr zu dem eben beschriebenen Gleichgewichtscore hin. Das Gleichgewicht stellt sich nach ca. 3-4 Gesamtdurchläufen von Brennelementen durch den Reaktor ein.

3.1.2 Die charakteristischen Daten des OTTO-Reaktors

Das gleiche Datenblatt wie die Tab. 2 für den Peu-à-Peu Reaktor stellt nun auch für den OTTO-Reaktor die wesentlichen Betriebsdaten zusammen.

		OTTO
Leistung therm.	MW	100
Höhe/Radius	cm	420/150
Brennstoff		UO ₂
Schwermetall	g/Kugel	7
Anreicherung	%	8.4/10.2*
Eintritts./Austritts- Temperatur des Heliums	°C	250/750
Heliumdruck	bar	40
Mittlerer Abbrand	MWd/kg _{HM}	81
Dauer des Abbrandzyklus	Tage	904
Konversionsrate		0.42
Neutronen Leakage	%	17.7
Spaltstoff Inventar	kg/GW _{th}	513
U ₂₃₅ Beschickung/Entladung	kg/GWd _{th}	1.14/0.25
Pu _{fiss} Entladung	kg/GWd _{th}	0.082
U _{3O8} Bedarf	kg/GWd _{th}	284
max. Leistung pro Kugel	KW/Kugel	1.26
max. Brennstofftemperatur	°C	797
Helium Druckverlust	bar	0.179
max. Druckentlastungs- störfalltemperatur	°C	1420
* Innere/äußere radiale Schicht		

Tab. 3: Daten des OTTO-Basisreaktors

Da bei dem folgenden Vergleich zusätzlich zu den charakteristischen Werten des Reaktors vor allem auch die Verteilung der Leistung, der Temperaturen und des Abbrandes über das Core wichtig sind, stellt die folgenden Abbildung diese Verteilungen dar.

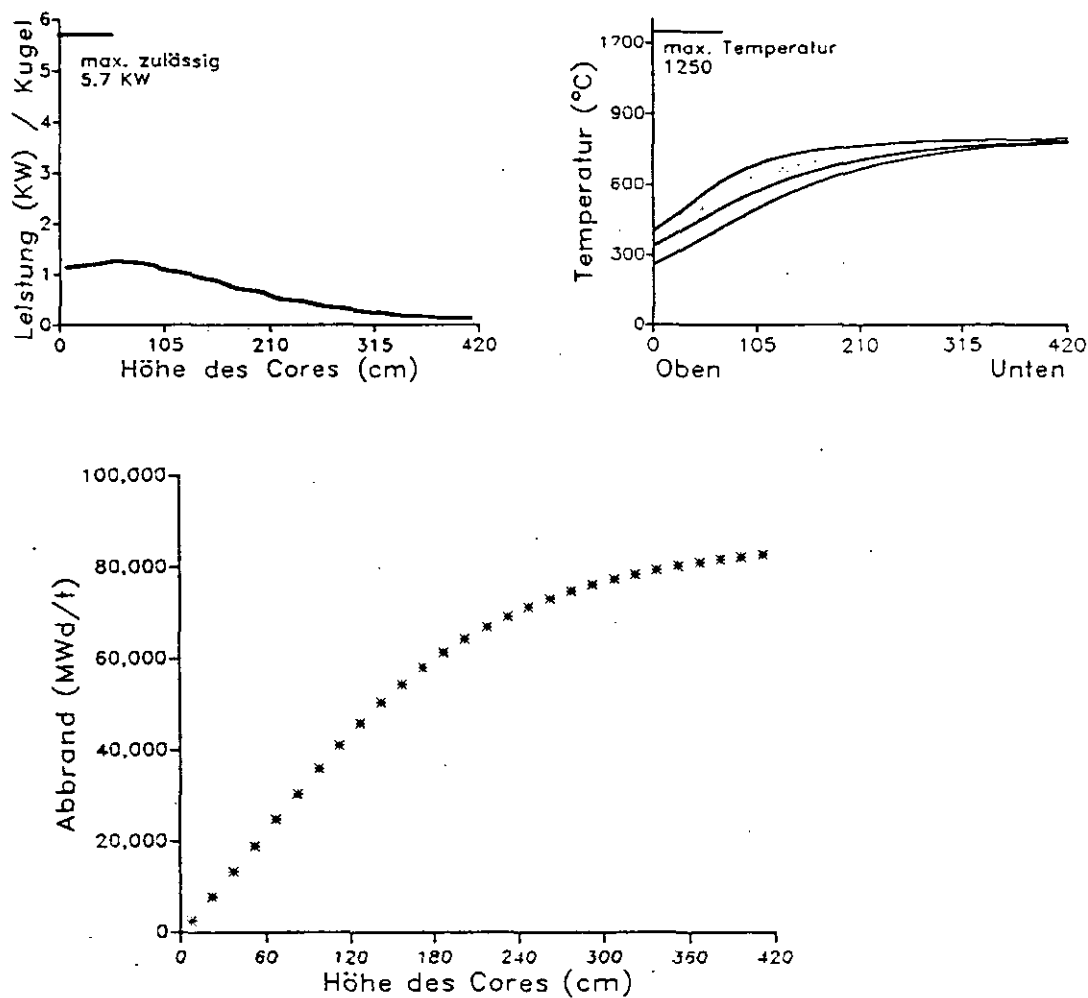


Abb. 20. Leistung-, Temperatur- und Abbrandverteilung des OTTO-Reaktors

3.1.3 Das Störfallverhalten des OTTO-Reaktors

Es gelten genau die gleichen Überlegungen, wie sie schon in Kap. 2.4 über die kritischste Art des Störfalles angestellt wurden. Deshalb wird auch beim OTTO-Reaktor der Nachwärmestörfall mit Druckentlastung untersucht.

Da der Reaktor in einem stationären Betriebszustand arbeitet, herrschen zu allen Zeitpunkten des Reaktorbetriebes im Gleichgewicht dieselben Störfallausgangsbedingungen. (Es kann also ein Störfall zu einem beliebigen Zeitpunkt untersucht werden: Es handelt sich immer um einen repräsentativen Störfall.)

Die Abb. 21 auf Seite 41 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Brennstofftemperatur während des Störfalles.

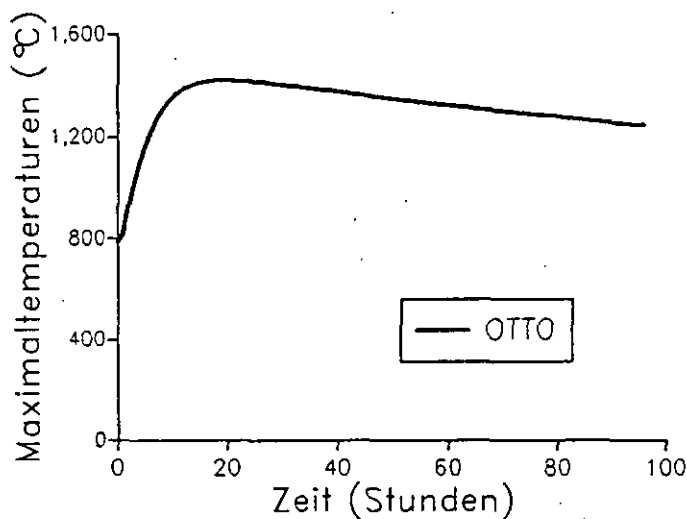


Abb. 21. Verlauf der max. Störfalltemperatur des OTTO-Reaktors

3.2 Unterschiede der Reaktoren und die sich daraus ergebenden Vor- und Nachteile

Mit dem Peu-à-Peu Beschickungskonzept wird eine oft als wesentlicher Vorteil vorgebrachte Eigenschaft der Hochtemperaturreaktoren mit kugelförmigen Brennelementen aufgegeben, nämlich der kontinuierliche Brennstoffwechsel und damit auch der kontinuierliche Reaktorbetrieb.

Als Vorteil resultiert hieraus eine deutliche Vereinfachung des Reaktorkonzeptes. Es kann nämlich auf eine Brennelemententladevorrichtung, die die Brennelemente bei Leistungsbetrieb unter Druck aus dem Reaktor entnimmt, verzichtet werden. Es entfallen die entsprechenden mechanischen Einrichtungen, die der Peu-à-Peu Reaktor nicht mehr benötigt. Da unterhalb des Cores keine abgebrannten Brennelemente mehr bewegt werden müssen, kann sich auch die Bauhöhe des Reaktors verringern. Die Beschickungsarbeiten an einem solchen Reaktor können sich auf das Zugeben von Brennstoff in gewissen Zeitintervallen beschränken. Der Betrieb vereinfacht sich dadurch erheblich und ist vielleicht auch ganz ohne Personal denkbar. Gerade in einer Zeit, in der die nukleare Industrie der öffentlichen Kritik ausgesetzt ist, weil ein Teil der Bevölkerung der Meinung ist, daß eine solche Technik wegen der großen Kompliziertheit und damit Undurchschaubarkeit für den Laien und nicht zuletzt wegen des menschlichen

Versagens als Fehlerquelle nicht beherrschbar sei, könnte ein solches Konzept durch seine Einfachheit überzeugen.

Die bauliche Ausführung eines Peu-à-Peu Reaktors wäre sicher billiger als die eines OTTO-Reaktors, da die Kugelentnahme unter Druck entfallen und sich damit eine geringere Bauhöhe und auch einfachere Coregeometrie ergeben würde. Eine Quantifizierung der Kostenersparnis ist hier kaum möglich, es ist aber unwahrscheinlich, daß sich eine Kostenersparnis von mehr als 10% ergeben würde.

Eine Kostenersparnis bei den Anlagekosten ist gerade in der Kernenergie von besonderer Bedeutung, da im Vergleich zu fossilen Kraftwerken die Kapitalkosten den größten Kostenteil ausmachen. Über 60% der Energieerzeugungskosten sind in der Kernenergie Kapitalkosten. Es ist daher sehr schade, daß zum jetzigen Zeitpunkt die Kostenersparnis bei den Anlagekosten des Peu-à-Peu Reaktors noch nicht genau quantifiziert werden kann. Sie sollte aber immer als wesentlicher Vorteil des Peu-à-Peu Reaktors in Erinnerung behalten werden.

Die Simulation liefert die Betriebs- und Brennstoffdaten. Ausgehend von diesen Größen können die Reaktoren verglichen werden. Besonders interessant ist es, die Gründe für die unterschiedlichen spezifischen Brennstoffverbräuche zu untersuchen. Auch sollte man feststellen, welche Leistungssteigerungen der unterschiedlichen Reaktortypen ohne eine Einschränkung der Sicherheit möglich sind. Denn beide Reaktoren sind auf die zwar in der Größenordnung sinnvolle, aber dann doch auf die nach Anschaulichkeit gewählte Leistung von 100 MW ausgelegt worden. Eine mögliche Leistungssteigerung hängt nun von dem Abstand der in der Simulation ermittelten Temperaturen zu den entsprechenden Temperaturgrenzwerten ab.

Daher werden in der Tab. 4 noch einmal die Daten des Peu-à-Peu, des OTTO- und zum Vergleich auch die des bekannteren MODUL-Reaktors mit Mehrfachdurchlauf zusammengestellt.

		Peu-à-Peu Start→Ende	OTTO	MEDUL
Leistung therm.	MW	100	100	200
Höhe/Radius	cm	420/150	420/150	960/150
Brennstoff		UO ₂	UO ₂	UO ₂
Schwermetall	g/Kugel	7	7	7
Anreicherung	%	13(8*)	8.4/10.2**	7.6
Eintritts./Austritts- Temperatur des Heliums	°C	250/750	250/750	250/700
Heliumdruck	bar	40	40	60
Mittlerer Abbrand	MWd/kg _{HM}	81	81	80
Dauer des Abbrandzyklus	Tage	913	904	1024
Konversionsrate		0.36	0.42	0.49
Neutronen Leakage	%	31.6→17.0	17.7	12.9
Spaltstoff Inventar	kg/GW _{th}	372→598	513	428
U ₂₃₅ Beschickung/Entladung	kg/GWd _{th}	1.55/0.56	1.14/0.25	0.94/0.12
Pu _{fiss} Entladung	kg/GWd _{th}	0.092	0.082	0.09
U _{3O8} Bedarf	kg/GWd _{th}	385	284	232
max. Leistung pro Kugel	KW/Kugel	3.17→1.56	1.26	1.3
max. Brennstofftemperatur	°C	1147→819	797	795
Helium Druckverlust	bar	0.097→0.181	0.179	0.85
max. Druckentlastungs- störfalltemperatur	°C	1621→1492	1420	1402
* 30 cm Bodenschicht				
** Innere/äußere radiale Zone				

Tab. 4: Vergleichsdaten der verschiedenen Reaktoren

Die Tabelle zeigt deutliche Nachteile des Peu-à-Peu Reaktors bei dem Brennstoffbedarf als auch bei den max. erreichten Temperaturen im Störfall wie auch im Normalbetrieb. Daher sollen diese Punkte noch einmal in den nächsten Abschnitten besonders betrachtet, bewertet und hieraus auch Vorschläge zur Verbesserung gewonnen werden.

3.2.1 Höherer Brennstoffbedarf des Peu-à-Peu Reaktors

Die Daten der Tab. 4 geben an, daß der U_{3O8} Bedarf des Peu-à-Peu Reaktors um fast 36 % höher ist als der des OTTO-Reaktors. Zwei wesentliche Gründe sind hierfür verantwortlich: Der Hauptgrund liegt im diskontinuierlichen Betrieb des Peu-à-Peu Reaktors. Dieser muß bei jedem Betriebszyklus ein kritisches Core "investieren". Dies ist so zu verstehen, daß sowohl am Anfang als auch am Ende des Zyklus der Reaktor kritisch sein muß, wenn auch am Zyklusende nur gerade noch. Die Brennstoffe, die zur Bildung dieses Cores benötigt werden, können folglich auch nicht abgebrannt werden. Der Brennstoffverbrauch errechnet sich hier: Im Zyklus eingesetzter Brennstoff zu im Zyklus abgegebener Energie.

Beim OTTO-Beschickungskonzept dagegen wird kontinuierlich der Brennstoff durchgesetzt, das kritische Core, welches auch hier zum Betrieb unabdingbar ist, braucht aber nur einmal für die gesamte Zykluszeit aufgebracht zu werden. Bei der Berechnung des Brennstoffverbrauches wird es auch gar nicht hinzugerechnet. Der Brennstoffverbrauch wird zum Zeitpunkt des Gleichgewichtszustandes berechnet: Durchgesetzter Brennstoff pro Zeiteinheit zu abgegebener Energie pro Zeiteinheit.

Dies führt dazu, daß die im Peu-à-Peu Reaktor eingesetzte erhöhte Anreicherung nicht durch einen entsprechend höheren Abbrand genutzt, sondern nur der nahezu gleiche mittlere Abbrand (in $\text{MWd/kg}_{\text{HM}}$) erreicht wird. Bei OTTO wandern die Kugeln durch den Reaktor und werden auf ihrem Weg immer weiter abgebrannt, bis sie schließlich mit dem Endabbrand den Reaktor verlassen. Die Abb. 20 auf Seite 40 zeigt den Anstieg des Abbrandes mit zunehmendem Durchlauf durch den Reaktor.

Beim Peu-à-Peu Reaktor dagegen stellt sich eine Abbrandverteilung der Brennelemente über die Corehöhe ein, die dann auch dem Endabbrand der Brennelemente entspricht, da sie im Reaktor nicht bewegt werden können. (Siehe dazu die Abb. 9 auf Seite 26.) Es zeigt sich, daß hier deutlich höhere Abbrände als der durchschnittliche Abbrand auftreten, daß aber gerade im oberen Bereich, in dem die Brennelemente erst kurz zugeladen sind, die Abbrandhöhe sehr niedrig ist. Bei diesen Brennelementen wird ein großer Teil der eingesetzten Spaltstoffe nicht genutzt.

Aus dieser Feststellung resultiert die Idee, die oberen Brennelemente dem Reaktor zu entnehmen und aus ihnen einen Teil des neuen Grundcores im folgenden Betriebszyklus aufzubauen. Sie könnten die Rolle der weniger angereicherten Brennelemente in dem unteren Grundcorebereich übernehmen. Diese wichtige Verbesserungsidee wird im nächsten Hauptkapitel eingehend untersucht.

Der zweite Punkt für den höheren Uranbedarf ist noch zu nennen. Der Reaktor startet mit einem kleinen Grundcore (3m Durchmesser, 1.2m Höhe) und wird dann peu à peu aufgefüllt. Dabei ändert sich die Leakage vom Zyklusanfang bis zum Zyklusende von 31.6% bis 17.0%. Durch die große Leakage des wenig gefüllten Reaktors ist die schlechte Konversionsrate des Peu-à-Peu Reaktors hauptsächlich bedingt. Er erbrütet sich also selbst weniger Brennstoff als im Vergleich der OTTO-Reaktor. Dieser geringere Bruteffekt hat sicher auch einen Anteil am erhöhten Uranbedarf. Dieser Effekt kann nicht kompensiert werden, da er durch die Funktionsweise des Peu-à-Peu Beschickungssystems bedingt ist. Die deutlichen Verbesserungen des Uranbedarfs, die im nächsten Abschnitt erreicht werden, zeigen, daß dieser Effekt für max. 30% des höheren Uranbedarfes verantwortlich ist. Genauere Abschätzungen liegen zur Zeit noch nicht vor.

Es steht damit fest, daß ein gewisser höherer Brennstoffverbrauch ein Preis für die Vorteile des Peu-à-Peu Reaktors ist. Gerade deshalb sollte versucht werden, den Uranverbrauch so gering wie möglich zu halten.

3.2.2 Welche Leistungssteigerungen sind bei den Reaktoren noch möglich?

Es ist sinnvoll, diesen Punkt in zwei Abschnitte zu unterteilen. Einmal sollte erörtert werden, welche Leistungssteigerungen der verglichenen Reaktoren möglich sind, ohne daß Veränderungen an der Größe oder an der Geometrie der Reaktoren vorgenommen werden. Dann sollten kurz Möglichkeiten angesprochen werden, wie evt. größere Reaktoren mit diesen Beschickungskonzepten zu realisieren wären.

3.2.2.1 Mögliche Leistungserhöhungen ohne Veränderungen an den Reaktoren

Es sollen die geforderten Sicherheitsbedingungen beibehalten werden. Dies bedeutet, daß die Grenzen für Leistungserhöhungen die Temperaturen sind, die sich max. im Reaktor einstellen. Hier gelten für den Normalbetrieb 1250° C und als max. Störfalltemperatur ca. 1600° C.

Beim Grundcore des Peu-à-Peu Referenzreaktors wurde schon eine Schichtung aus zwei Anreicherungen eingeführt, damit die Temperatur im Grundcore nicht über die gerade genannten Grenzen stieg. Auch bei der Störfalltemperatur ergibt sich kein Spielraum nach oben. Die max. Störfalltemperatur des Grundcores liegt mit 1621° C schon fast zu hoch.

Nur eine Veränderung des Grundcores könnte somit eine Leistungssteigerung zulassen. Der OTTO-Reaktor arbeitet mit einem Zwei-Zonen-Core. Deshalb wäre es auch eine Überlegung, ein Zwei-Zonen-Core für den Peu-à-Peu Reaktor einzuführen. Dies würde aber nach der Meinung des Autors der Idee der Einfachheit widersprechen und auch die Verhältnisse im Grundcore, welches ja vor allem für die Probleme verantwortlich ist, nicht entscheidend entlasten.

Der Reaktor könnte also nur durch eine Vergrößerung des Grundcores eine Erhöhung der Leistung verkraften, aber dies würde dann die Zykluszeit doppelt verkürzen. Einmal wäre weniger Raum für das Nachladen der Brennelemente und zum anderen würden diese auch noch schneller abbrennen.

Zusammenfassend sollte man feststellen, daß die 100 MW für den Peu-à-Peu Reaktor dieser Größe unter Berücksichtigung der Idee "Einfachheit und Sicherheit" die maximale Leistung, die er konstant über die gesamte Zykluszeit abgeben kann, darstellt.

Eine Idee zur Leistungssteigerung eines Peu-à-Peu Reaktors mit anderer Geometrie findet sich im folgenden Kapitel.

Anders sieht es beim OTTO-Reaktor aus. Die Maximaltemperatur im Normalbetrieb ist mit 797°C völlig unkritisch und bei der Störfalltemperatur (1420° C) ist noch ein Spielraum von fast 200° C.

Eine Leistungssteigerung von 10 oder 20 % ist hier durchaus denkbar. Daß der OTTO-Reaktor bereits ein Zwei-Zonen-Core besitzt, welches hilft, die Zentraltemperaturen zu senken, ist mit ein Grund für diesen Vorteil des OTTO-Reaktors.

3.2.2.2 Größere Reaktoren mit Beschickungssystemen OTTO oder Peu-à-Peu

Für den OTTO-Typ sollte man die Planungen für den HTR 500 nennen. Hier handelt es sich zwar um einen Reaktor, der nicht ganz den Kriterien der "Definitiv passiven Sicherheit" entspricht, aber es handelt sich um ein abgeschlossenes Planungskonzept mit nur etwas anderer Sicherheitsphilosophie.

Unter Beibehaltung der "Definitiv Passiven Sicherheit" kommen nur Vergrößerungen des Corevolumens mit gleichzeitigem Einbau einer Mittelsäule in Frage. Der Übergang von einem zylindrischen Core zu einem ringförmigen Core bewirkt, daß Reaktoren mit um Faktoren größerer Leistung gebaut werden könnten, die auch noch alle Forderungen bezüglich Einfachheit und damit Sicherheit erfüllen würden.

Gerade bei einem Core mit Mittelsäule bietet das Peu-à-Peu Konzept deutliche Vorteile gegenüber dem OTTO-Konzept. Das ringförmige Core mit dem ebenen Boden des Peu-à-Peu Konzeptes kann viel einfacher eine Mittelsäule aufnehmen, als wenn ein ringförmiger Coreboden noch mit Kugelabzügen bestückt werden müßte. Bei einem solch größeren Reaktor könnten die Baukosten für den Peu-à-Peu Typ deutlich günstiger als für den OTTO-Typ sein.

4.0 Verbesserungen am Peu-à-Peu Konzept

Bei einem derart neuen Konzept besteht noch eine große Palette von noch nicht untersuchten Verbesserungs- und Optimierungsmöglichkeiten. Es erscheint daher sinnvoll, grundsätzliche Richtungen der Verbesserungen herauszustellen und die untersuchten Verbesserungen dann diesen Richtungen zuzuordnen.

Als Grundvoraussetzungen möglicher Veränderungen sollen aber immer die Hauptideen des Peu-à-Peu Reaktors "Einfachheit und Sicherheit" gewahrt bleiben.

4.1 Sinnvolle Zielsetzungen der Verbesserungen

1. Erhöhung der Zyklusdauer

Eine der sinnvollen Richtungen für Verbesserungen ist der Versuch, die Dauer der Zykluszeit zu erhöhen.

Als extremsten Fall könnte man sich einen Reaktor mit Peu-à-Peu Beschickung vorstellen, der als Heizreaktor mit kleiner Ausgangsleistung und auch geringerer Austrittstemperatur ausgelegt ist. Mit einem solchen Reaktor sind Zykluszeiten von 10 bis evt. sogar 30 Jahren realisierbar. Ein solcher Reaktor stellt natürlich ein anderes Konzept dar als der in dieser Arbeit vorgestellte. Es kann an dieser Stelle auch nur die Idee zu einem solchen Reaktor vorgestellt werden. Dieser Heizreaktor sollte ausschließlich über Temperatureffekte geregelt werden. Regelstäbe sollten nur der Kaltabschaltung dienen. Die Regelung des Leistungsbetriebes würde wie folgt geschehen: wenn dem Reaktor wenig Energie entnommen wird, geschieht dies über eine Verminderung der Gebläseleistung. Der Reaktor wird also heißer und durch die negative Temperaturrückkopplung wird die Leistung entsprechend der Energieabgabe geregelt. Bei erhöhter Abnahme von Wärmeenergie wird die gleiche Wirkungskette aktiv, nur die Effekte sind genau entgegengesetzt. Es wäre vorstellbar, daß ein solcher Reaktor ohne eine ständig anwesende Bedienungs-mannschaft arbeiten könnte, eine Fernüberwachung wäre als ausreichende Überwachung des Betriebes denkbar. Untersuchungen zu einem solchen Reaktor, der zwar keine Peu-à-Peu Beschickung aufweist, sondern direkt den Brennstoff für den 14 jährigen Betrieb enthalten soll, sind schon von der BBC-HRB unter der Überschrift "Gasgekühlter Heizreaktor GHR 10 MW" durchgeführt worden. Die Peu-à-Peu Beschickung könnte in ein solches Konzept einfließen.

Als zweite Möglichkeit wäre zu nennen, an dem vorgestellten Reaktor die Bauhöhe zu vergrößern, so daß mehr Brennelemente zugeladen werden können und sich somit die Zykluszeit erhöht. Auch eine Vergrößerung der Anreicherung der nachzuladenden Brennelemente würde die Abbrandzeit pro Schicht und dann auch die Gesamtzykluszeit

erhöhen. Beide gerade angesprochenen Schritte könnten auch kombiniert werden. Vor dem tatsächlichen Bau eines Reaktors dieses Typs wird es notwendig sein, diesen hinsichtlich der Länge der Zykluszeit zu optimieren. Eine Grundlage dieser Optimierung werden dann die konkreten Werte, die den Entladevorgang beschreiben, wie Entladedauer, Betriebsunterbrechung, Aufwand usw., sein. Diese Angaben liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Prinzipiell sollte man aber schon untersuchen, durch welche Maßnahmen eine Verlängerung der Zykluszeit möglich wäre. Dies würde aber den Umfang dieser Arbeit überschreiten.

In diesen Untersuchungen wurde ein Fall mit erhöhter Anreicherung von 16 % der auf das Grundcore nachzuladenden Brennelemente untersucht. Dabei ergab sich eine Verlängerung der Zykluszeit von 913 auf 1117,5 Tage. Da diese Untersuchung durchgeführt wurde, um die Abhängigkeit des spez. Uranverbrauchs von der Höhe der Anreicherung aufzuzeigen, befinden sich die Untersuchungsergebnisse in dem Kapitel "Verbesserung der Uranausnutzung".

2. Höhere Leistung

Im letzten Kapitel wurde schon ausgeführt, daß der Autor eine Leistungssteigerung des Reaktors bei gleichbleibenden Abmaßen für nicht sinnvoll hält, sondern daß sie seiner Meinung nach sogar der Idee des Peu-à-Peu Systemes widersprechen würde.

Sinnvoll wäre es dagegen, die Leistung eines Peu-à-Peu Reaktors durch ein Reaktorkonzept mit ringförmigem Core zu erhöhen. Die Vorteile dieses Konzeptes wurden schon dargestellt. Es würde sich aber um ein neues und eigenständiges Konzept handeln. Eine Anlehnung an die Abmaße der MODUL-Bauweise ist dann nicht mehr möglich. Es wäre ein ganz neuer Reaktor zu konzipieren.

Die genannten Ideen sollen eigentlich mehr verdeutlichen, welche sinnvollen Konzepte noch mit einem Peu-à-Peu beschickten Reaktor denkbar wären, ohne daß sie Gegenstand dieser Arbeit sein können.

3. Verbesserung der Uranausnutzung

Diese Idee ist entscheidend für die Konkurrenzfähigkeit eines Peu-à-Peu Reaktors. Der viel höhere spezifische Uranbedarf ist ein großer Nachteil bei diesem Reaktor. Die schon angesprochen Idee, die wenig abgebrannten Brennelemente aus dem oberen Reaktorbereich wiederzuverwenden, wird deshalb im folgenden Unterabschnitt eingehend behandelt.

4.2 Verbesserung der Uranausnutzung

4.2.1 Neues Grundcore mit wiederverwendeten Brennelementen

Die Abb. 9 auf Seite 26 zeigt die Abbrandverteilung des Referenzreaktors. Aus dieser Abbildung geht hervor, daß die im oberen Corebereich liegenden Brennelemente einen geringen Abbrand haben. Die zuletzt zugeladene Schicht erreicht gerade 2000 MWd/t und die sechstoberste auch erst ca. 50000 MWd/t Abbrand. Falls man diese, wie es in dem Konzept des Referenzreaktors vorgesehen ist, so in die Endlagerung geben würde, gelangten auch weniger abgebrannte Brennelemente in die Entsorgung. Durch bessere Ausnutzung dieser Brennelemente könnte wirkungsvoll dem erhöhten Uranverbrauch des Peu-à-Peu Reaktors entgegengewirkt werden.

Aus diesen Überlegungen folgt die Idee, aus den wenig abgebrannten Brennelementen des oberen Corebereiches einen Teil des nächsten Grundcores zu bilden.

Am Anfang dieser Untersuchungen wurden einige verschiedene Möglichkeiten getestet, wie ein neues Grundcore unter Verwendung der schon eingesetzten Brennelemente aufgebaut werden könnte.

Anzahl der Schichten des Grundcores	Anzahl der wiederverwendeten Schichten	Anreicherung der frischen Brennelemente (%)	K_{eff}	Maximale Brennstoff-Temperatur (° C)	Weitere Untersuchungen (Ja/Nein)
8	8	---	0.887	1291	Nein
8	6	2*13	0.939	1277	Nein
8	4	4*13	0.987	1275	Ja
8	5	3*13	0.964	1276	Nein
8	5	3*14	0.968	1265	Nein
8	5	3*16	0.975	1246	Nein
8	5	3*18	0.982	1228	Nein
8	6	2*13	0.939	1277	**
8	6	2*14	0.941	1279	Nein
9	6	3*13	0.985	1197	Ja
9	6	3*14	0.988	1189	Ja
** Wegen der Übersichtlichkeit zweimal in der Tabelle					

Tab. 5: Verschiedene Grundcorevarianten mit wiederverwendeten Brennelementen

Die Tabelle 5 zeigt die verschiedenen Grundcorevarianten, wobei die erste Spalte der Tabelle die Gesamtanzahl der Schichten des Grundcores angibt. Die zweite und die dritte Spalte geben dann die Aufteilung dieser Gesamtanzahl der Grundcoreschichten in die Anzahl der aus dem vorhergehenden Zyklus wiederverwendeten Schichten (Spalte 2), und in die Anzahl und Anreicherung der frisch in das neue Grundcore eingebrachten Schichten (Spalte 3); wieder. Dabei wird bei den wiederverwendeten Schichten angenommen, daß immer die obersten Schichten aus der alten Corefüllung in das neue Grundcore eingebracht werden und zwar in der Reihenfolge, daß die am höchsten abgebrannte Schicht zuunterst im neuen Grundcore liegt und daß dann die weitere Schichtung entsprechend dem abnehmenden Altabbbrand der wiederverwendeten Schichten vorgenommen wird. Die Schichten werden so im Core aufeinandergelegt, um den Effekt der Leistungssenkung im unteren Corebereich zu erhalten, der beim Grundcore des Referenzreaktors durch die zwei Schichten mit der auf 8% gesenkten Anreicherung unten im Grundcore erzielt wurde. Denn auch das Spar-Grundcore darf keine zu hohen Temperaturen erreichen.

Die Spalte 4 gibt nun die K_{eff} Werte und die Spalte 6 die maximale Brennstofftemperatur bei Vollast der untersuchten Grundcores an. Die K_{eff} Werte liegen alle unter 1. Das bedeutet, die Grundcores sind gar nicht kritisch. Die Gründe, warum man nicht versucht, die Grundcores kritisch zu machen sind: Man möchte nicht durch Verändern der Anreicherung die Kritikalität erreichen, sondern man sagt sich, wenn ein Grundcore schon fast kritisch ist, dann kann man einfacher ein paar Brennelemente zu dem Grundcore dazuladen, bis es kritisch ist. Dies bei der Simulation durchzuführen ist nicht notwendig, da das Simulationsprogramm auch ein unterkritisches Core simulieren kann, da es zeitunabhängig arbeitet und seine Leistung nicht dynamisch nach dem K_{eff} Wert bestimmt, sondern konstant eine vorgegebene Leistung einstellt. Durch diese Vorgehensweise ist gesichert, daß die errechneten Temperaturen nicht unterschätzt werden, da eine Vergrößerung des Grundcores die Leistungsdichte und dann auch die Maximaltemperatur senken würde.

Die Tab. 5 gibt in ihrer Zeilenanordnung die Reihenfolge wieder, wie bei der Suche nach möglichen Grundcores vorgegangen worden ist. Zuerst wurden, um ein Gefühl für die K_{eff} Werte dieser Grundcores zu gewinnen, einfach verschieden viele Schichten (8, 6 und 4) wiederverwendet und das Grundcore sonst wie bei Basisfall (8 Schichten) mit frischen Brennelementen der Anreicherung 13 % aufgefüllt.

Die erreichten Reaktivitätswerte fielen zu gering aus und die max. Temperaturen im Core stiegen über die erlaubten 1250° C. Daher wurde dann versucht, eine Wiederverwendung von 5 Schichten zu realisieren und durch Erhöhung der Anreicherung der frischen Schichten K_{eff} in die Nähe von 1 zu bringen.

Erst bei der Anreicherung von 18 % waren die Bedingungen weitgehend erreicht. Es muß erklärt werden, warum die maximale Temperatur bei Erhöhung der Anreicherung fällt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Leistung des Cores immer konstant auf 100 MW gehalten wird. Wenn nun im oberen Bereich des Grundcores die Anreicherung erhöht wird, verändert sich die Leistungsverteilung. Die spezifische Leistung steigt im oberen Grundcorebereich und sinkt dafür in den anderen Bereichen. Ein Sinken der spezifischen Leistung im unteren Corebereich läßt dann auch die Maximaltemperatur, die sich nach den Erfahrungen mit dem Referenzfall dort einstellt, sinken.

Da die vorherigen Rechnungen gezeigt hatten, daß das Grundcore auch bei den Störfallrechnungen die höchsten Temperaturen erreichte, die schon geringfügig über der Grenze von 1600° C lagen, wurde das Grundcore aus 5 wiederverwendeten und 3 Schichten a 18 % nicht weiter untersucht, da es zu nahe an den Grenzwerten lag. Das Gleiche galt dann auch für die zwei folgenden Grundcores aus 8 Schichten, bei denen 6 Schichten wiederverwendet werden sollten.

Die Untersuchungen der Spar-Grundcores aus 8 Schichten führten zu der Annahme, daß es schwierig sein würde, ein solches Grundcore zu realisieren, ohne an die Sicherheitsgrenzen zu stoßen. Deshalb wurde von einem Grundcore aus 8 Schichten zu einem mit 9 Schichten übergegangen. Die zwei letzten Zeilen der Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse. Sowohl bei dem Spar-Grundcore mit 13 % als auch 14 % Anreicherung liegen die K_{eff} Werte in der Nähe von 1 und die Temperaturen deutlich unter 1200°C. Es erschien sinnvoll, diese beiden Sparcores weiter zu untersuchen. Vor allem zu Vergleichszwecken wurde zusätzlich ein 8-Schichten-Grundcore, bei dem nur 4 Schichten wiederverwendet werden, untersucht, obwohl es auf Grund seiner Temperaturwerte nicht verwendet werden dürfte.

Um Aussagen über das Ausmaß der Spareffekte machen zu können, muß für jedes weiter zu untersuchende Sparcore ein gesamter Reaktorzyklus berechnet werden. Um dem Gedanken der "Einfachheit" Rechnung zu tragen, wird immer mit derselben Anreicherung aufgefüllt, mit der auch das Grundcore ergänzt wurde.

Die Tab. 6 zeigt die Ergebnisse der Simulation des gesamten Zyklusses für die drei Grundcorevarianten.

Anzahl der Schichten im Grundcore	Anzahl der wiederverwendeten Schichten	Anreicherung der frischen Brennelemente (%)	Zykluszeit (day)	U_3O_8 Bedarf (kg/GWd _{th})	Entladeabbrand (MWd/kg _{HM})
8	4	13	906.8	346	94.3
9	6	13	867.6	331.5	98.4
9	6	14	943,3	328.8	107.0
Referenzreaktor			913	385	81

Tab. 6: Zykluszeit, Uranbedarf und Abbrand beim Einsatz von Spargrundcores

Der Uranbedarf wird nun wie folgt berechnet: Es werden für einen Zyklus jetzt nicht mehr 28 Schichten benötigt wie beim Referenzreaktor (26 Schichten a 13 % und 2 Schichten a 8 %), sondern nur noch die, die frisch zugeladen werden. Aus diesen wird der U_3O_8 Bedarf ermittelt.

Es zeigt sich, daß durch die Maßnahme des Wiederverwendens eines Teiles der Brennelemente deutlich Uran gespart werden kann. Es muß aber noch geklärt werden, ob auch der modifizierte Reaktorbetrieb am Zyklusende wieder eine Abbrandverteilung ergibt, mit der dann wieder ein "Spargrundcore" aufgebaut werden kann. Es muß gezeigt werden, daß kontinuierlich die oberen Schichten wieder das nächste Grundcore bilden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen nun jeweils für die verschiedenen Sparcores den Endabbrand immer im Vergleich zu dem Abbrand des Referenzreaktors, aus dessen oberen Schichten ja alle Sparcores mitaufgebaut werden.

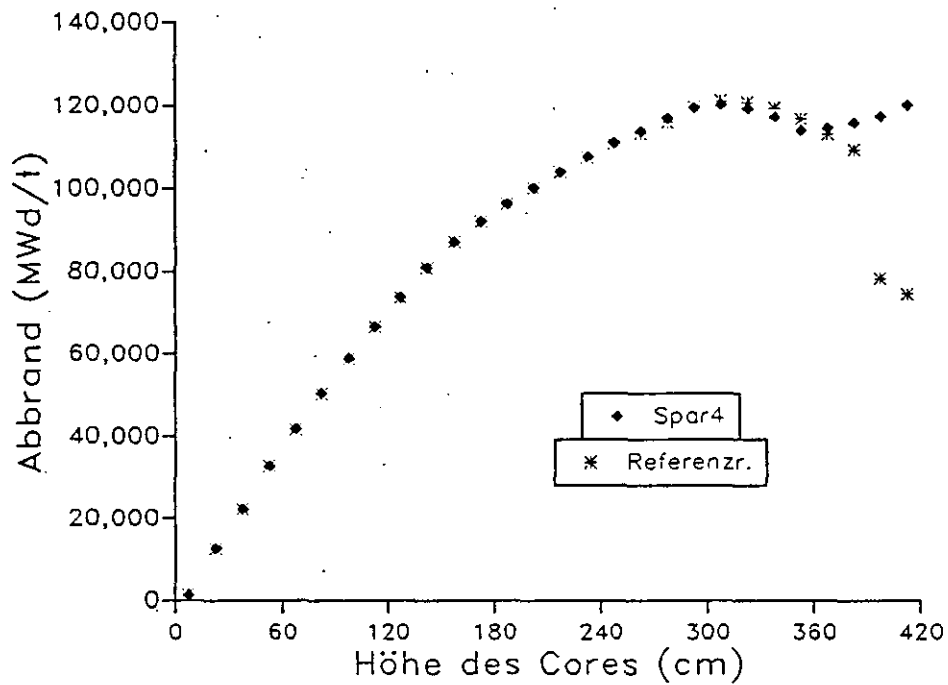


Abb. 22. Vergleich Abbrandverteilung 4-Schichten-Sparcore und Referenzreaktor

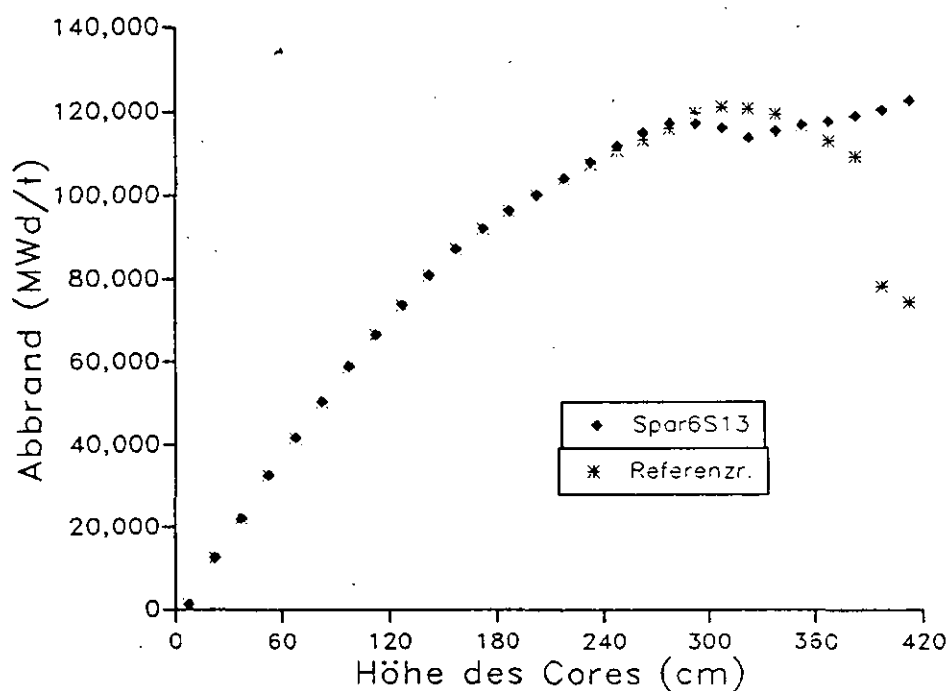


Abb. 23. Vergleich Abbrandverteilung 6-Schichten-Sparcore (13 %) und Referenzreaktor

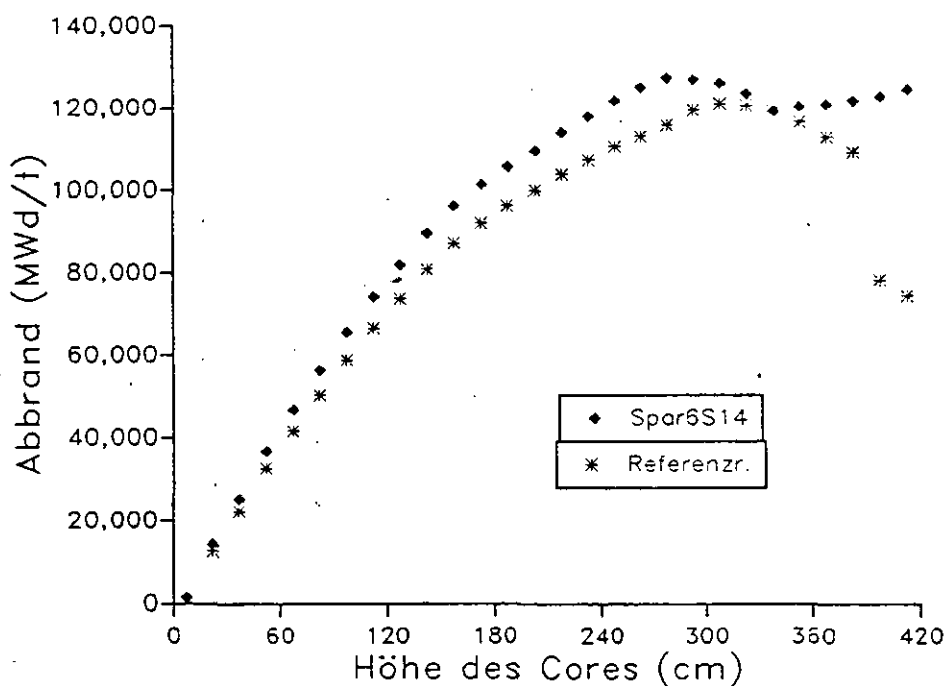


Abb. 24. Vergleich Abbrandverteilung 6-Schichten-Sparcore (14 %) und Referenzreaktor

Auf allen drei Abbildungen ist eine sehr positive Verteilung des Abbrandes der Sparcores zu beobachten. Es stellt sich in der unteren Corehälfte (210 bis 420 cm) eine gleichmäßige Abbrandverteilung ein. Dies ist besonders erwähnenswert, da es an sich zu erwarten gewesen wäre, daß gerade die im unteren Bereich eingesetzten Brennelemente, durch den zweiten Einsatz im Reaktor, einen zu hohen Abbrand erhalten würden. Dies ist nicht der Fall. Es ist sogar so, daß der höchste Abbrand bei ca. 250 cm auftritt.

Bei Abb. 22 auf Seite 53 und Abb. 23 auf Seite 54 treten sehr genaue Übereinstimmungen in den Abbrandverteilungen auf. Es ist nur ein Unterschied im Bereich des Grundcores (300 bis 420 cm) festzustellen. Dies ist leicht verständlich, da jetzt im Grundcore keine Brennelemente mehr mit der Anreicherung von 8 % eingesetzt werden und die wiederverwendeten Brennelemente einen gewissen Abbrand aus dem vorherigen Einsatz mitbringen.

Bei der Abb. 24 auf Seite 54 stellt sich ein deutlich höherer Abbrand ein, da hier ja auch Brennelemente mit der höheren Anreicherung von 14 % eingesetzt werden. Aber im oberen Corebereich von 0 bis 90 cm, dies ist der Bereich, aus dem die Brennelemente für das nächste Spargrundcore genommen werden sollen, sind die Unterschiede noch nicht groß. Diese geringen Unterschiede im oberen Bereich bei allen drei Fällen belegen, daß es möglich ist, auch bei einem Zyklus mit Spargrundcore wieder eine Abbrandverteilung zu erhalten, die den erneuten Aufbau eines Spargrundcores zuläßt. Es kann also nach einem Startzyklus mit einem Referenzgrundcore dann immer mit einem Sparzyklus gearbeitet werden, der die Schichten für das nächste Spargrundcore wieder erzeugt.

Die Einsparungen an Natururan sind beträchtlich. Bei der Wiederverwendung von nur vier Schichten senkt sich der Uranbedarf schon um 10 %, bei der Wiederverwendung von 6 Schichten sind es schon zwischen 14 und 15 %. Da die Kosten für das Wiedereinbringen der schon benutzten Brennelemente zum größten Teil von den Baukosten für eine solche Vorrichtung abhängen, sollte die Menge der wiederverwendeten Brennelemente erstens so groß wie möglich und zweitens so groß, wie es die Reaktivitäts- und Abbrandverhältnisse zulassen, sein.

Interessant ist, daß es jetzt durch diese Verbesserungsvorschläge möglich ist, den Reaktor nur mit Brennelementen einer Anreicherung zu bestücken, wobei einmal von dem Grundcore, mit dem gestartet wird, bevor man den Reaktor mit Sparzyklen weiterbetreiben kann, abgesehen wird.

4.2.2 Höhere Anreicherung der zugeladenen Brennelemente

Es sollte einmal ein erster Überblick gewonnen werden, wie sich die Uranausnutzung ändern würde, wenn der Reaktor mit Brennelementen höherer Anreicherung beladen

würde. Dazu wurde das Grundcore des Referenzfalles beibehalten und es wurden dann darauf Brennelemente mit der Anreicherung von 16 % aufgefüllt.

Die Tab. 7 zeigt das Ergebnis.

Anreicherung der aufgeladenen Brennelemente (%)	Zykluszeit (day)	U_3O_8 Bedarf (kg/GWd _{th})	Abbrand der entladenen Brennelemente (MWd/kg _{HM})
13	913	385	81
16	1117.5	373.4	99.6

Tab. 7: Verschiedene Anreicherung der aufgeladenen Brennelemente

Die Erhöhung der Anreicherung der Brennelemente allein ergibt noch keine sehr große Verminderung des Brennstoffbedarfs. Die Erhöhung der Anreicherung um 3 % ergibt eine Verringerung des Uranverbrauches von auch 3 %.

Eine deutlich bessere Wirkung zeigte der Verbesserungsvorschlag "Spargrundcore". Deshalb sollte versucht werden, diese Einsparung zu realisieren und diese evt. noch zusätzlich durch höhere Anreicherungen zu verbessern.

5.0 Einsatzmöglichkeiten des Peu-à-Peu Konzeptes

Die aktuelle Diskussion um die Frage der Kernenergie wird zur Zeit sehr kontrovers in der Bundesrepublik Deutschland geführt. Die zukünftige Nutzung der Kernenergie scheint ungewiß.

Wie sind unter diesem Gesichtspunkt Forschungen an einem Reaktorkonzept zu sehen, welches als Ergänzung oder vielleicht auch Ersetzung der jetzigen Reaktorlinien gedacht ist, zu rechtfertigen?

Die Betrachtung der Energiesituation der Welt läßt viele Ungewißheiten für die Zukunft zu. Es ist weder geklärt, wann das Erdöl aufgebraucht sein wird (glaubhafte Schätzungen sprechen von 30 Jahren), noch durch welche Energieträger es ersetzt werden soll. Unklar sind auch die Risiken, die mit der Verbrennung von fossilen Brennstoffen verbunden sind. Auch die Risiken der Kernenergie sind noch nicht bis ins letzte geklärt, wie die vielfältigen Forschungen auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit und gerade auch des Brennstoffkreislaufes zeigen. Auch die Erschließung der Sonnenenergie ist sowohl in Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit, als auch auf die konkrete Realisierung noch nicht geklärt.

Sicher ist also nur, daß im Hinblick auf die zukünftige Energieversorgung der Welt die meisten Fragen noch offen sind. Daher ist auch ein Ausschließen der weiteren Nutzung der Kernenergie nicht sinnvoll. Sondern die verschiedenen, erfolgversprechenden Energiearten müssen bis zur Klärung der vielen offenen Energiefragen konkurrierend weiterverfolgt werden.

Wenn man jetzt einmal voraussetzen würde, daß die Menschheit nicht auf die Kernenergie verzichten kann, dann gilt dies sowohl für die Industrienationen als auch für Entwicklungsländer. Der meist gebaute Typ von Kernkraftwerken ist der Leichtwasserreaktor. Der Leichtwasserreaktor benötigt ein aufwendiges Sicherheitssystem, welches aktiv die Sicherheit gewährleistet. Auf Grund dieses Konzeptes der Leichtwasserreaktoren hat sich auf der Welt eine Baugröße dieses Reaktortypes mit ca. 1300 MW_{el} durchgesetzt. Dieses Konzept hat seine Aufgabe in der preiswerten Erstellung großer Mengen von Grundlaststrom. Das bedeutet gleichzeitig, daß Leichtwasserreaktoren recht unflexibel sind, Energie in einer anderen Form abzugeben. Sie werden daher fast nur zur Stromerzeugung in Gebieten eingesetzt werden, die über eine Infrastruktur verfügen, die eine so große zentral erzeugte Strommenge aufnehmen und auch Ausfälle solch großer Leistungseinheiten vertragen kann. Hier entstehen große Schwierigkeiten, diese Reaktoren evtl. in Entwicklungsländern einzusetzen.

Dies bedeutet, daß bei einer weiteren Nutzung der Kernenergie es nötig sein wird, Kernenergie auch in kleineren Leistungseinheiten und auch in ihrer Nutzung flexibler

einzusetzen. Dies sind die Gebiete, in denen prädestiniert Hochtemperaturreaktoren eingesetzt werden können, die ja gerade durch ihre spezifischen Sicherheitsaspekte in kleinen Anlagen vielfältig nutzbare Wärmeenergie auf hohem Temperaturniveau (heute bis zu 950° C) erzeugen können.

Wie einige Beispiele in der Arbeit zeigten, kann das Peu-à-Peu Beschickungssystem die Flexibilität der Hochtemperaturreaktoren noch zusätzlich steigern.

Falls also die Notwendigkeit einer mittelfristigen oder gar langfristigen Nutzung der Kernenergie besteht, wird es auch die Notwendigkeit einer größeren Flexibilität der Kernenergie geben. Und gerade für den flexiblen Einsatz sind die Hochtemperaturreaktoren und besonders auch solche mit einer Peu-à-Peu Beschickung bestens geeignet.

6.0 Literaturverzeichnis

- /TE 87/ E. Teuchert, H. Gerwin, K. A. Haas: "Simplicity and Safety Features of the Peu-à-Peu Pebble Bed HTR", Internat. Meeting on Advances in Reaktor Physics. SF/ANS/ENS, Paris, April 1987, Pg. 1259 ff.
- /TE 80/ E. Teuchert, U. Hansen, K. A. Haas: "V.S.O.P.-Computer Code System for Reaktor Physics and Fuel Cycle Simulation", Bericht der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 1649, März 1980.
- /GHT 81/ GHT, Gesellschaft für Hochtemperaturreaktor-Technik mbH: "Hochtemperaturreaktor-MODUL zur Prozeßwärmeerzeugung". Technischer Bericht 78.2634.1, GHT, Bergisch Gladbach 1, Oktober 1981